





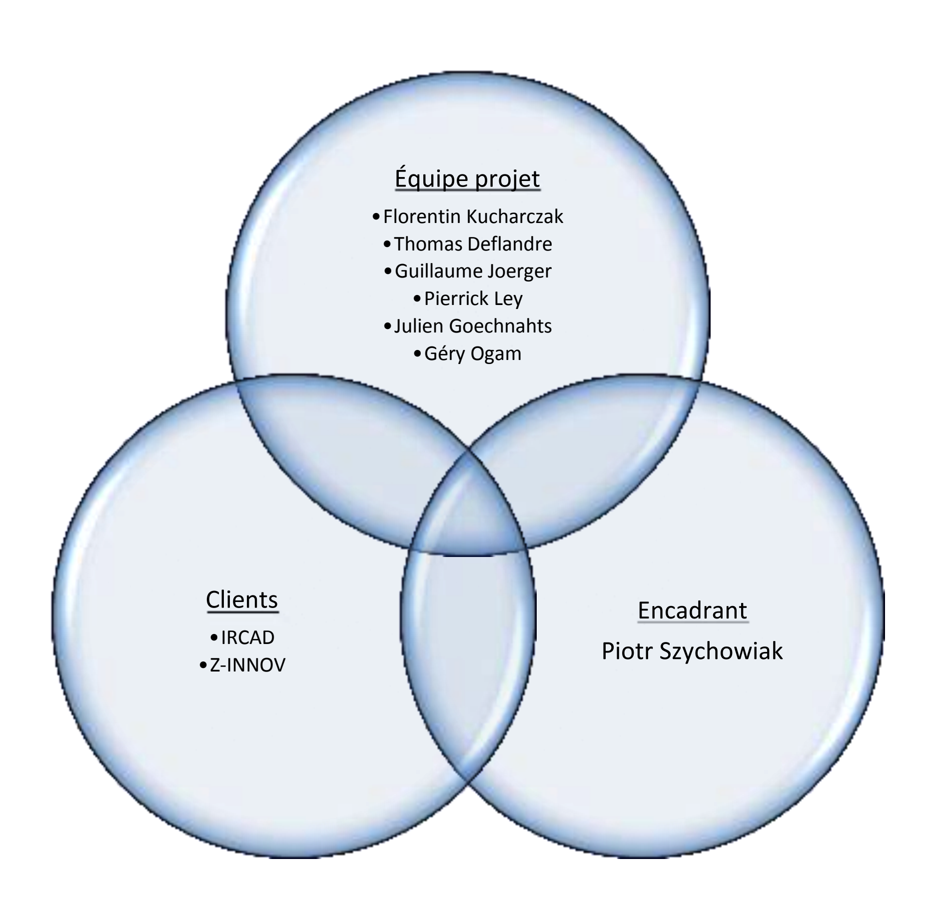
PROJET INGENIEUR 2012-2013

11 Avril 2013

RAPPORT PUBLIC

Equipe projet n°6

Réalisation d'une tablette PC équipée de deux caméras proche infrarouge pour visualiser en réalité augmentée des vaisseaux sanguins sous-cutanés



Résumé

Notre projet intitulé « Réalisation d'une tablette PC équipée de deux caméras proche infrarouge pour visualiser en réalité augmentée des vaisseaux sanguins sous-cutanées et un modèle préopératoire d'un patient » a été proposé par l'association de deux entreprises : l'**IRCAD** (Institut de Recherche contre les Cancers de l'Appareil Digestif) et **Z-INNOV,** entreprise spécialisée en électronique et systèmes embarqués.

Il a pour but d'offrir au chirurgien un outil lui permettant de préparer son opération de manière optimale. Les objectifs seront développés précisément par la suite.

Ce projet a donc été confié à notre équipe de six élèves ingénieurs de Télécom Physique Strasbourg. C'est un immense honneur d'expérimenter le mode projet en collaboration avec ces entreprises sur un travail mêlant divers domaines d'application enseignés à l'école tels que : le traitement d'images, l'optique, l'électronique et la programmation.

Ce rapport a pour but de retracer notre travail effectué ces dix-huit derniers mois sur ce projet.

Nous avons commencé par prendre connaissance des différentes ressources mises à notre disposition par l'école et nos clients puis nous avons mené une étude de faisabilité technique et juridique avec un important travail de documentation. Une fois le cahier des charges signé, nous avons débuté la conception du prototype en suivant un planning précis décomposant le projet en modules. En clair, nous avons effectué une campagne expérimentale avec un prototype de tests, avons développé des algorithmes de traitement d'images et l'avons intégré sur le prototype final livré le 2 mai 2013. Chaque module a été traité décomposé en tâche afin d'opérer efficacement en équipe et chaque tâche a été validée au fur et à mesure par les clients avec un plan qualité.

Comme le stipule le sujet, l'objectif était d'exploiter deux caméras afin d'observer les vaisseaux sanguins en trois dimensions (stéréoscopie). Ceci dit, cet objectif a été réduit à l'utilisation d'une seule caméra et de valider le concept.

À la fin de celui-ci figurent également tous les documents relatifs à la gestion de projet tels que le planning, le budget global, le cahier des charges et notre plan qualité.

Abstract

Our project "Design of a PC tablet equipped with two near-infrared cameras for augmented reality vision of subcutaneous blood vessels and a setting of a preoperative model of a patient" was proposed by the IRCAD (Institute for Research against Digestive Cancer) and Z-INNOV, a company specialized in electronics and embedded systems.

It aims at facilitating the handling of the practitioner during surgery and optimizes the procedure. The goals will be specifically developed in the follow-up.

This project has been entrusted to our team of six students in engineering in the graduate school Télécom Physique Strasbourg. This is a great opportunity to learn methods of project management in collaboration with these two companies on a subject covering various application fields taught in school such as image processing, optics, electronics and computing.

This report aims at retracing the work completed these last eighteen months.

At first we have got acquainted with the various resources at our disposal and then we have led a feasibility study through an active work of bibliographic control on the internet. Once the specifications have been agreed to by the team and the clients, we have begun the design of the prototype by following a specific planning to the letter which divided the tasks into modules. In other words, we have started by leading an experimental campaign with a testing prototype, then we have developed a processing software and we have eventually transferred it to the final prototype which will be delivered on May 2. 2013. Each module has been efficiently completed by gradually validating the tasks with a quality plan.

As is said in the subject, the aim was to use two cameras in order to visualize the blood vessels in three dimensions with the stereoscopy. This being, we had to operate some change in the specifications and we came to the conclusion that only one camera would be operational on the final prototype.

All the documents related to project management such as: planning, budget estimations, technical specifications and our quality plan are attached to this report.

Remerciements

Nous tenons à remercier Télécom Physique Strasbourg pour nous avoir offert l'opportunité de travailler sur un projet aussi passionnant, en particulier à Jelila Labed qui a su tenir compte de notre souhait lors de l'affectation des sujets.

De plus, nous remercions nos deux clients, Stéphane Nicolau et Sven Luther pour leur soutien et leur supervision, sans qui nous n'aurions pas acquis autant de connaissances techniques dans ce domaine.

Ensuite, nous remercions Piotr Szychowiak pour son expertise et ses précieux conseils.

Nous souhaitons également remercier Dominique Perthuis pour son apport en gestion de projet.

Enfin, nous souhaitons remercier Vincent Agnus de l'Ircad pour le temps qu'il nous a consacré à nous former sur le traitement d'images et qui a su nous guider.

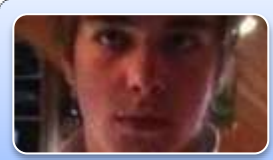
Table des matières

Chapitre 1 : Le projet

I. Présentation de l'équipe

Constituée de six membres, l'équipe s'est organisée de manière cohérente par affinités autour de centres d'intérêts communs, à savoir l'imagerie médicale et le domaine de la santé en général.

A la demande de l'équipe de pilotage, la première étape a consisté en l'attribution d'un poste de responsabilité à chacun. Voici une brève présentation de notre équipe :



Florentin Kucharzcak

- En tant que Chef de Projet, c'est lui qui coordonne les différentes tâches à effectuer et contrôle leur bon déroulement.



Thomas Deflandre

- En tant que Responsable de la Communication.Intermédiaire entre le groupe et les intervenants extérieurs, c'est lui qui centralise et diffuse les informations inhérentes au projet.



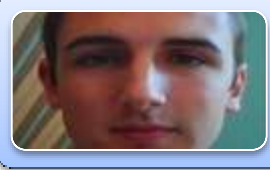
Guillaume Joerger

- En tant que Responsable Financier. Il a pour rôle la gestion des dépenses, tant réelles avec l'acquisition de bien que fictives en contrôlant les horaires de travail de chaque membre.



Pierrick Ley

- En tant que Responsable Qualité, il veille au respect des clauses du projet ainsi que des méthodes de travail.



Julien Goechnahts

- En tant que Responsable Technique. C'est lui qui supervise et organise les différents actes techniques.



Géry Ogam

- En tant que Coresponsable Technique.

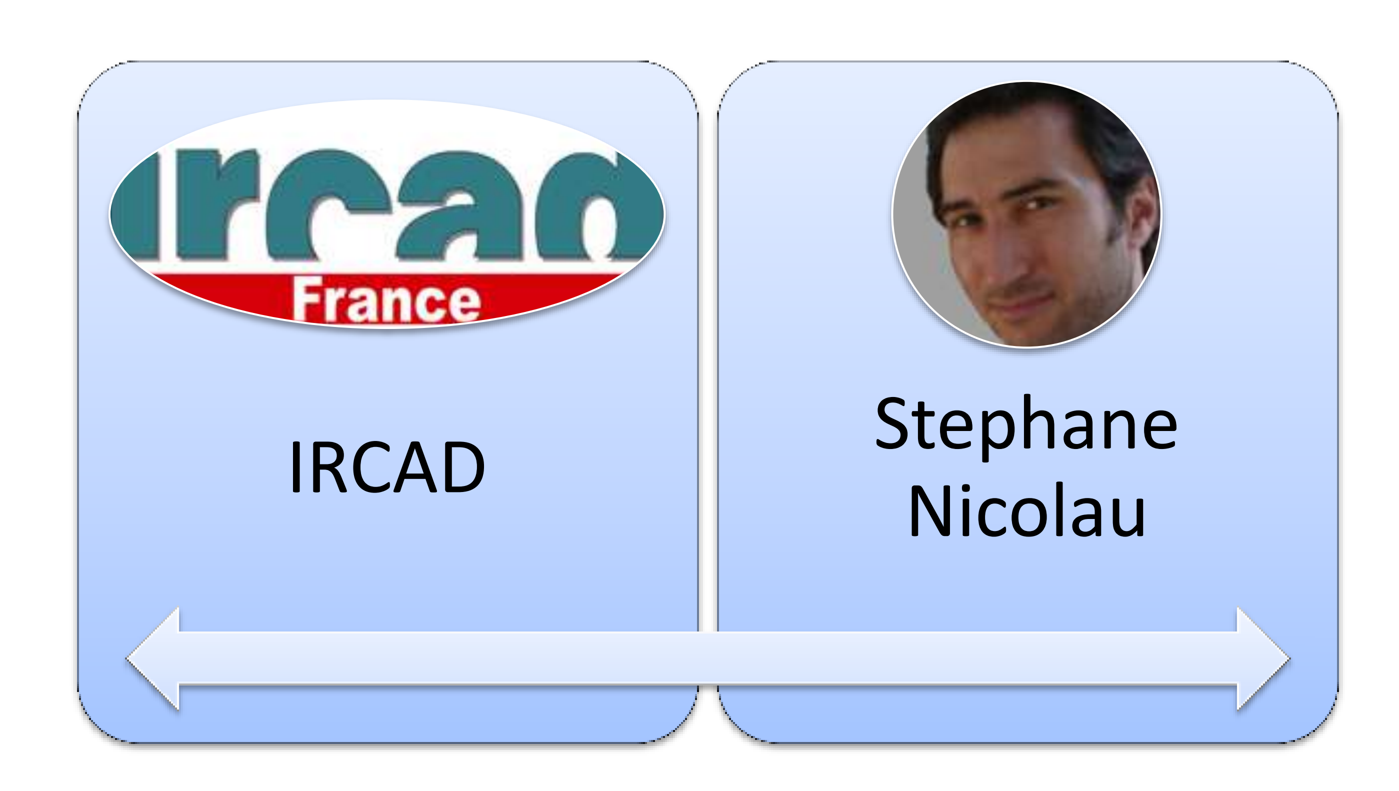
II. Des partenaires prestigieux

Nos clients sont l'Institut de Recherche contre les Cancers de l'Appareil Digestif (IRCAD) et Z-Innov représentés respectivement par messieurs Stéphane Nicolau et Sven Luther.

1. L'IRCAD

L'IRCAD (Institut de Recherche contre les Cancers de l'Appareil Digestif) a été fondé en 1994 au sein des Hôpitaux Universitaires de Strasbourg. Il réunit des laboratoires de Recherche en Cancérologie Digestive et en Robotique Médicale, un département Recherche et Développement Informatique et un centre de formation en chirurgie mini-invasive.

Une dimension internationale: l'IRCAD est aujourd'hui reconnu à travers le monde comme le centre de référence en chirurgie laparoscopique. 3500 chirurgiens du monde entier viennent chaque année se former à Strasbourg sous le contrôle d'experts de renommée internationale.



Stéphane Nicolau, notre contact privilégié occupe au sein de l'IRCAD le rôle de responsable de la réalité augmentée pour le département Recherche et Developement (R&D) Informatique.

2. Z-INNOV

Z-INNOV est une entreprise strasbourgeoise spécialisée principalement dans le domaine de l'informatique et de l'électronique.

En électronique Z-Innov conçoit des cartes électroniques intégrant une grande variété de composants. Wifi, Bluetooth, ZigBee, 3G, écrans tactiles, sorties haute définition, processeur multimédia etc…

En informatique les compétences de Z-INNOV s'étendent à l'ensemble des outils possibles dans un système embarqué.



Z-INNOV est, tout au long de la réalisation de ce projet, notre interlocuteur privilégié pour tout ce qui concerne l'intégration de composants spécifiques sur notre carte électronique de base, les problèmes de transfert et acquisition de données, etc.

III. Visualisation des vaisseaux sanguins en réalité augmentée

1. *Besoins, enjeux et objectifs*

Notre projet intitulé « Réalisation d'une tablette PC équipée de 2 caméras proche infrarouge pour visualiser en réalité augmentée des vaisseaux sanguins sous-cutanées et un modèle préopératoire d'un patient » a pour but comme son nom l'indique de créer un système de tablette type Ipad ayant pour but de permettre la visualisation des vaisseaux sanguins ; du torse principalement pour notre application.

En effet lors d'une opération en chirurgie laparoscopique, le chirurgien a besoin de procéder à des petites incisions sur le torse afin de positionner des trocarts :

- Pour l'insertion de gaz carbonique servant à soulever les parois de l'abdomen et protéger les organes abdominaux lors de l'insertion des instruments chirurgicaux.
- Pour le positionnement des instruments dans l'abdomen.
- Pour l'insertion d'une caméra endoscopique.



Figure 1 : Opération laparoscopique

Le positionnement relatif des trocarts par rapport aux organes du patient est très important pour optimiser l'intervention. En pratique, le chirurgien compte sur sa connaissance anatomique du patient pour faire ses choix, ce qui résulte, lors d'une erreur d'appréciation, de faire un orifice supplémentaire dans la peau du patient.

Malheureusement, il arrive parfois que le chirurgien sectionne ou endommage avec le trocart une des artères présentes dans la paroi abdominale. Les complications dues à ce type d'incident sont fréquentes et rallongent notamment le temps de l'intervention car il faut évidemment suturer l'artère coupée.

L'objectif de développement d'un tel système est alors de permettre au chirurgien d'éviter ce genre de complications.

La tablette PC aura un double bénéfice :

- Un gain de temps pour le chirurgien : il ne perd plus de temps à rechercher les causes du saignement.
- Une facilitation de l'opération pour le chirurgien, et également, un temps de guérison post-opératoire réduit pour le patient.

À terme, le but, serait pour l'IRCAD de déposer un brevet et commercialiser notre produit en cas de conclusions positives des études préliminaires et des résultats obtenus avec le prototype qui sera livré en seconde année. Tout ce travail préalable, s'il est concluant, permettra de servir d'appui solide pour l'obtention d'éventuels financements pour une production à plus grande échelle.

2. Etude théorique

Les objectifs inhérents à l'étude théorique sont avant tout la préparation de la conception du livrable, qui elle se déroulera durant la deuxième partie du projet : le prototypage. Ils couvrent en premier lieu la construction et l'organisation de l'équipe autour d'une dynamique commune ainsi que l'imprégnation du sujet proposé. L'acquisition du projet s'effectue par sa définition et la négociation de son contenu avec les clients afin d'aboutir à un engagement. Une étape de documentation est également nécessaire à la compréhension des concepts mis en jeu.

Ensuite, le projet défini et acquis par tous les acteurs, le travail consiste en l'organisation d'une démarche de réalisation. C'est littéralement une projection vers l'avenir dont le but est d'échantillonner le travail dans le temps. Nous devons donc dans cette optique produire une feuille de route, un planning et établir un budget. Ces éléments constitueront par la suite une référence de comparaison avec l'avancement effectif du projet.
Les échéances quant à elle sont organisées suivant deux axes :

- Une production orale avec la participation à trois présentations publiques.
- Une production écrite avec la rédaction de rapports bimensuels, d'un rapport public, d'une feuille de route et d'un cahier des charges fonctionnels ainsi que la réalisation d'une affiche.

3. Prototypage

L'objectif principal du projet est d'apporter une preuve de concept. C'est tout naturellement que la deuxième partie du projet a consisté à concevoir un produit répondant aux besoins des clients par la mise en forme d'un prototype. Nous avons donc accentué notre travail sur les aspects hardware et software.

Le premier travail a consisté en l'acquisition, la prise en main et l'expérimentation d'une caméra proche-infrarouge équipée de LEDS infra-rouge qui nous a permis, notamment, de valider nos hypothèses théoriques et de déterminer tout sorte de paramètres afin d'optimiser le rendu visuel.

Dès l'acquisition de premiers clichés, nous avons pu commencer à tester différents

algorithmes de traitement d'images. Cette étape fut longue et fastidieuse puisque l'objectif était d'obtenir le meilleur rendu possible quant à la visualisation des vaisseaux sanguins. Pour cela, nous avons testé de nombreux algorithmes puis hiérarchisé les différentes étapes afin d'aboutir à la chaîne de traitement la plus efficace.

Par la suite, nous avons réceptionné la tablette P.C. qui nous a permis d'afficher en temps réel les vaisseaux sanguins. Cette étape a fait l'objet de nombreux tests et de configurations afin de rendre opérationnelle la tablette et disposée à télécharger nos programmes de traitement.

Cette démarche de réalisation et d'expérimentations a été effectuée selon un planning très précis qui nous a permis de présenter régulièrement nos résultats, nos conclusions et notre avancement lors des quatre revues de projets, puis remettre le prototype final à nos clients lors de la présentation finale (le 30 avril 2013).

4. Evolution du cahier des charges

Initialement, il nous était confié de réaliser une tablette de type PC munie de deux caméras proche infrarouge afin d'afficher les vaisseaux sanguins sur un large écran intégré. Les deux caméras avaient pour but d'obtenir une image en trois dimensions, la stéréoscopie étant la valeur ajoutée vis-à-vis des appareils existants. La tablette se voulait d'être maniable (sans fil), légère, économique en énergie et de respecter les standards inhérents au milieu hospitalier. L'idée de transférer l'image acquise sur un écran mural ou un poste en dehors du bloc opératoire a été exploitée et nécessitait l'intégration de la norme Wi-Fi dans l'environnement de travail pour le transfert vidéo. Nous avons également évoqué la possibilité de projeter l'image acquise sur le corps du patient afin d'effectuer une cartographie sur la peau. Ceci mettait en œuvre un projecteur intégré.

Au vu de la complexité du projet, du délai à respecter, de notre réalisme et suite à nos diverses études et entretiens avec clients et encadrants, nous avons pris la décision de limiter notre travail à la preuve de concept avec leur accord. Ceci étant, notre objectif principal est d'offrir une base complète et modulable si le projet venait à être poursuivi par les clients.

En effet, nous avons abandonné toute idée de transfert d'image sur un poste environnant et réduit le nombre de caméra afin de nous concentrer sur la visualisation en lumière infrarouge avant d'y ajouter l'effet de stéréoscopie. De plus, le prototype final ne sera pas une tablette intégrée mais un assemblage d'éléments primaires tels que la carte d'acquisition, l'écran, le module caméra et un logiciel de traitement d'images. Ce logiciel est avant tout destiné à améliorer la qualité de l'image et de proposer des fonctionnalités de réalité augmentée.

Pour information, le cahier des charges original est donné en **Annexe 1**.

Chapitre 2 : Etude théorique

I. Recherches bibliographiques

1. Prise en main du sujet et de son domaine d'application

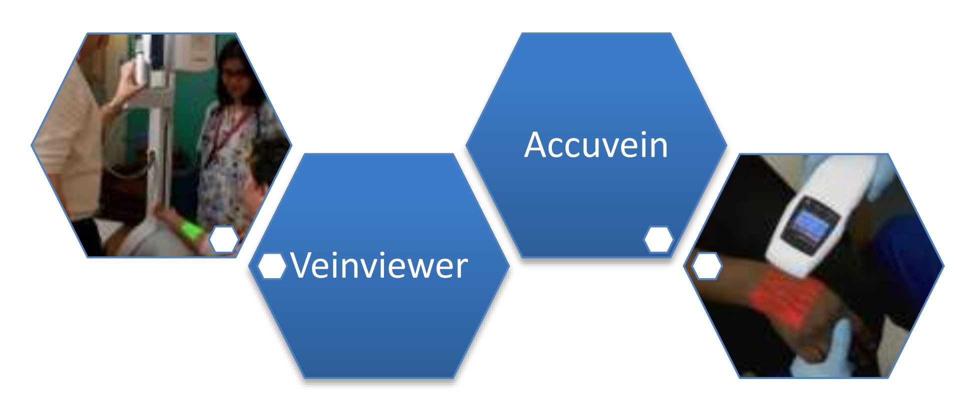
Chaque membre de l'équipe étant vivement attiré par les domaines de l'imagerie et des sciences du vivant, c'est naturellement que nous nous sommes tournés vers un tel projet. Après l'attribution officielle, il nous a fallu nous imprégner du sujet en étudiant diverses publications proposées par nos clients que nous avons étoffé avec divers documents trouvés en majeure partie sur internet.

C'est ainsi que nous avons pris connaissance des technique d'imagerie infrarouge appliquée à la médecine ainsi que des diverses problématiques de chirurgie contemporaine et plus précisément de la chirurgie laparoscopique. Cette séquence de prise en main s'est également soldée par la rencontre de nos clients et de notre encadrant. Nous avons pu prendre part à une réunion au sein de l'IRCAD début janvier 2012 afin de cibler les enjeux et définir le cadre du projet en présence de tous les acteurs.

2. Description de l'existant : brevets et systèmes analogues

Une partie de l'étude de faisabilité a été la recherche de brevet pouvant s'apparenter à notre projet. A l'aide de « *google patent* » et du site de *l'office européen des brevets* nous avons cherché des inventions s'apparentant à des appareils visualisant ou localisant les veines en utilisant une lumière infrarouge et un écran de visualisation.

Tout d'abord, nous avons rapidement remarqué qu'un certain nombre d'appareils existaient déjà. Nous pouvons citer les deux principaux: Accuvein (Patent No.: US 7 904 138 B2) et VeinViewer.



Cependant, ces appareils sont utilisés seulement pour localiser les veines, directement sur la peau, dans le but d'aider les praticiens pour insérer une aiguille.

Cette recherche nous a mené jusqu'à un brevet (Patent No.: US 6 178 340 B1) daté de 2001 faisant mention d'un appareil vraiment semblable au notre, c'est à dire avec une visualisation 3D sur

un écran. Mais ce brevet n'a été déposé qu'aux Etats-Unis et est aussi déposé pour un appareil permettant d'aider au positionnement d'aiguille ce qui n'est pas notre cas.

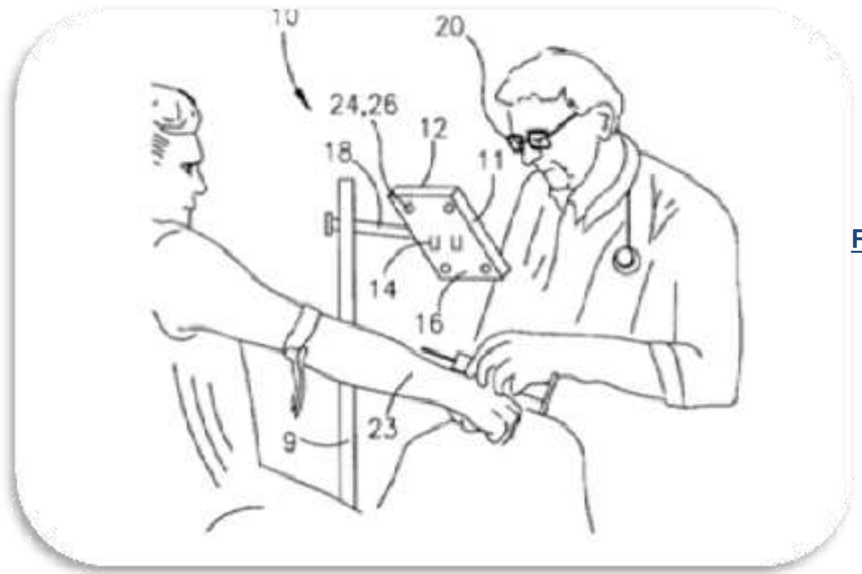


Figure 2 : Patent n° US 6 178 340 B1

Ainsi, ces brevets ne devraient pas nous limiter, et peut être même nous aider. En effet, nous avons pu voir quels systèmes analogues sont déjà existants. Nous pourrons dans notre avancement nous appuyer sur leurs expériences et même envisager de leur demander certaines informations ou conseils.

De plus, de nombreux appareils familiers tels que l'Apple iPod ont été détourné de leur utilisation primaire afin d'aider les praticiens. Pour cela, de nombreuses entreprises d'ingénierie biomédicale (Brainlab, Smith & Nephew, Osirix, 3M, A&D, Nonin & Omron, etc) ont collaboré avec des fabricants d'appareils digitaux afin de trouver des solutions au guidage chirurgical à l'aide de l'imagerie. Ces outils sont bien sûrs conçus pour optimiser des séquences et s'inscrit dans le cadre de l'informatisation des blocs opératoires.

A titre d'exemple, nous pouvons citer l'utilisation de l'Apple iPod Touch® en Inde et de l'Apple iPad au Japon dans le cadre d'opérations invasives.

Le Dash des laboratoires Brainlab exploite les gyroscopes et l'accéléromètre de l'iPod Touch afin d'assister les chirurgiens lors d'interventions orthopédiques. De plus, le dispositif utilise une caméra postée sur un trépied. L'appareil a été testé en Inde lors d'opérations du genou de manière satisfaisante.



Figure 3 : Ipod Dash application

En clair, c'est un système de guidage chirurgical par l'imagerie dont le but est d'aider les chirurgiens orthopédiques lors d'un remplacement intégral du genou. Ce guidage s'effectue avec la présence de références de visualisation sur le fémur et le tibia. L'appareil est relié à un instrument chirurgical suivi par des capteurs retranscrivant une image en 3 dimensions de l'os du patient sur un ordinateur. Nous pouvons ainsi bénéficier d'un placement optimal pour la prothèse ainsi qu'une minimisation de l'invasion. Il est important de noter que le procédé intègre les données du patient de manière peropératoire, c'est-à-dire pendant l'opération elle-même ce qui ne nécessite pas de création d'un modèle préopératoire.

L'appareil est en cours de certification aux Etats-Unis. *Une documentation détaillée de la part de Brainlab est disponible.*

Quant à l'iPad, le professeur japonais Maki Sugimoto a eu l'idée de concevoir, à l'aide d'une plateforme Macintosh, une technique de guidage consistant à effectuer une cartographie des organes qu'il peut projeter sur le patient en réalité augmentée. Cette conception s'est faite à l'aide d'un logiciel libre de visualisation appelé Osirix.

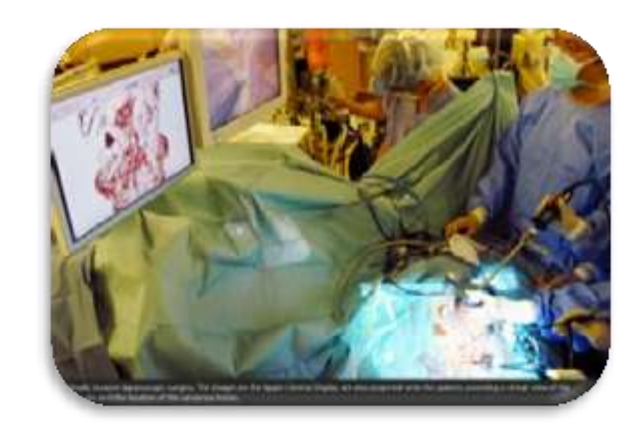


Figure 4 : Pr. Maki, chirurgie mini-invasive

II. Etude technique

1. Choix de la fenêtre de longueurs d'ondes d'étude optimale

Une partie importante de l'étude technique a été consacrée à la recherche de la meilleure bande de longueurs d'ondes afin d'observer les vaisseaux sanguins du torse de manière optimale, et également aux normes à respecter en matière de luminosité dans le bloc opératoire.

Avant de parler d'éclairage il a fallu déterminer ce qui était autorisé dans ce domaine à l'intérieur du bloc opératoire. La norme internationale EN 60601-2-41 sur les luminaires chirurgicaux et d'examen stipule que l'intensité lumineuse de l'éclairage en bloc opératoire doit être comprise entre 40 à 160 000 lux.

Ensuite s'est profilée la phase de recherche de la meilleure bande de longueurs d'ondes. Le choix le plus judicieux apparaît clairement être celui du proche infrarouge (NIR ou Near Infrared). Suite à une brève présentation de ce domaine de longueurs d'ondes, seront développés les éléments qui ont conduit à ce choix.

Le NIR est la région spectrale englobant la gamme de longueurs d'ondes de 780 à 2500 nm :

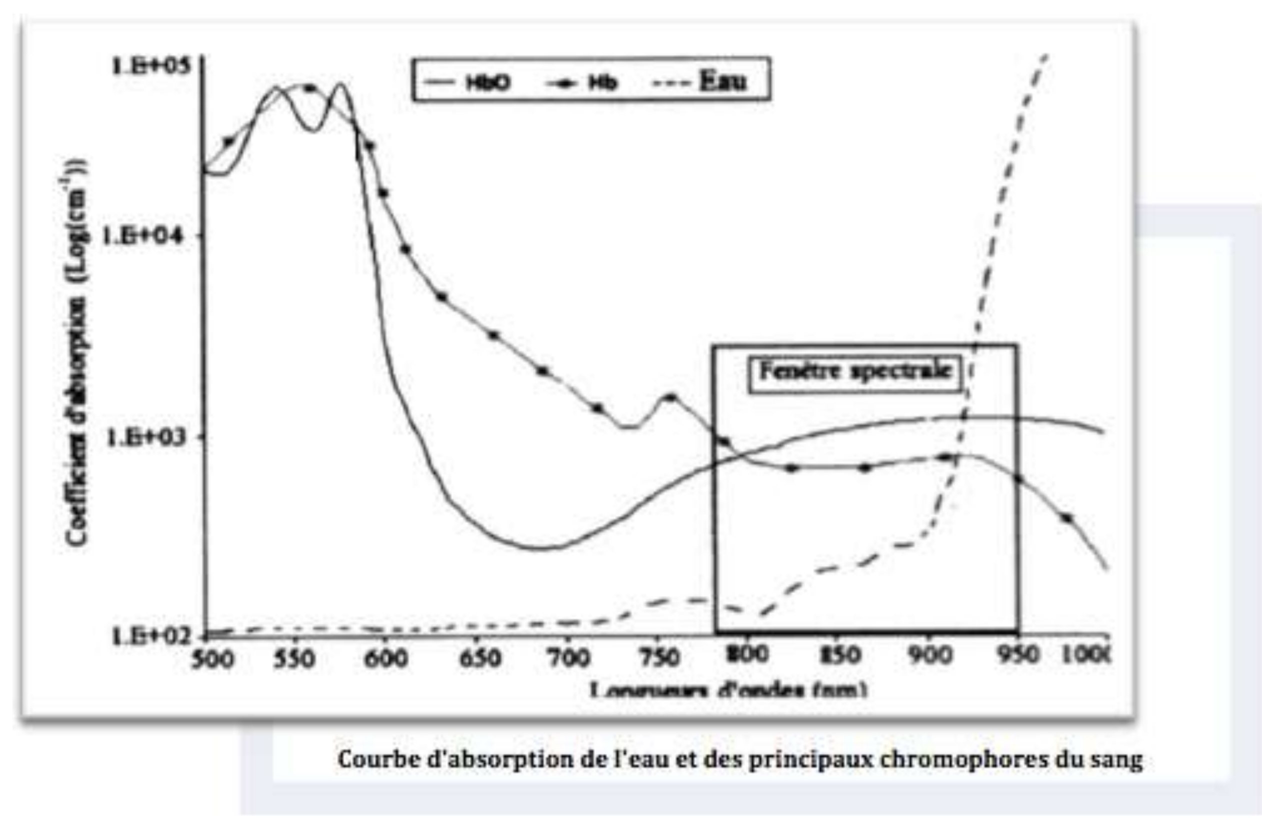
- Le tissu humain est relativement transparent dans le NIR, ce qui permet une pénétration suffisante de la lumière pour détecter des signaux à quelques centimètres de profondeur.
- L'hémoglobine dans le sang absorbe de manière quasi-parfaite la lumière IR dans le NIR. Par conséquent la structure des veines (capturée avec une caméra sensible aux longueurs d'ondes du NIR) est enregistrée sous forme d'ombres ou contours de l'image.

De plus, le proche infrarouge est une technique non destructrice et non nocive. Il n'y a pas de préparation d'échantillon avant analyse comme pour des procédés nécessitants dilutions, échauffements… En ce qui concerne la visualisation, elle est rapide et peu onéreuse en comparaison des autres techniques d'inspection.

Il a ensuite été question de réduire cette fenêtre d'étude.

Deux facteurs importants dans le choix de la fenêtre d'étude, l'absorption de :

- l'eau (constituant 70% des tissus et 38% du sang)
- les principaux chromophores du sang : l'oxyhémoglobine [HBO] + le dé-oxyhémoglobine [HB]



Courbe d'absorption de l'eau et des principaux chromophores du sang

Figure 5

Dans la fenêtre spectrale (780-950nm) la lumière pénètre profondément les différentes couches du tissu humain. De plus, l'absorption du proche infrarouge par l'hémoglobine est plus élevée.

Cette lumière est diffusée ou dispersée par la peau et la graisse sous-cutanée et absorbée par le sang qui apparaît donc comme une région sombre tandis que la peau et la graisse apparaissent plus claires.

La fenêtre de longueurs d'ondes d'étude semble clairement apparaître comme étant celle définie entre 780 et 950 nm.

Il a dans un dernier temps fallu choisir le mode de visualisation le plus adapté. Il existe trois modes de visualisation : par transmission, réflexion et transflexion. Après documentation sur ces trois différents modes il est clairement apparu que le mode par réflexion était le seul véritablement adapté.

En effet, les caméras sont placées du même côté que les émetteurs infrarouges. Les rayons sont réfléchis et ensuite captés par la caméra sensible à cette longueur d'onde comme nous pouvons l'observer sur la figure 6.

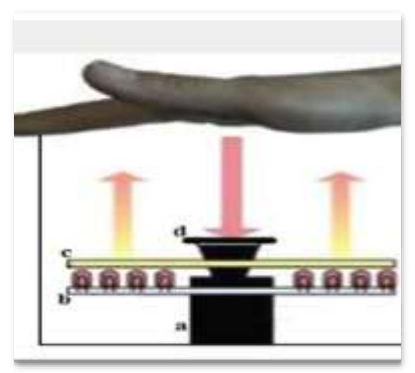


Figure 6 : Illustration du mode de visualisation par réflexion

2. Choix de la caméra la plus adaptée

Suite à cette étude il nous a fallu choisir la camera la plus adaptée a nos besoins. L'entreprise *Z-INNOV* nous a mis à disposition 3 différentes caméras. Nous avons étudié les caractéristiques de chacune, celles-ci sont résumées dans le tableau suivant, et fait un choix concernant celle qui apparait clairement comme celle répondant au mieux aux contraintes fixées par notre application.

Spécifications techniques	OV 7675	OV 2710	OV 10630
Résolution	-	2 MP,1080p	1 MP,720p
Taille des pixels	2,5 µm	3 µm	3,65 µm
Consommation électrique active	98 mW	350mW	507 mW
Consommation électrique en standby	60µW	-	440 µW
Sensibilité à la lumière	1,8 V/lux,sec	3,3 V/lux,sec	1,8 V/lux,sec
Format	VGA	HD	HD, HDR superposition de plusieurs images de différents contrastes pour une meilleure vision des détails
Equipements	Automatic image control functions	Automatic image control functions	Automatic image control functions

Taille du capteur	1/9 "	1/3"	1/2,7"
Fréquence d'acquisition	30 à 240 Hz	30 à 240 Hz	30 Hz
Qualité du signal (rapport signal sur bruit)	38dB	39dB	

Nous avons finalement fini par choisir le capteur CMOS de modèle OV10630 pour différentes raisons.

- Premièrement, sa fonction H.D.R. (High dynamic range) car celle-ci permet d'obtenir des images plus détaillées, sans zones surexposées ou sous-exposées, ce qui sera utile car l'éclairage artificiel en bloc opératoire est d'une forte intensité lumineuse (qui peut varier de 40 à 160 000 lux selon la norme internationale).
- Et également sa fonction de synchronisation d'images car nous avons besoin de synchroniser les images des deux capteurs que l'on va utiliser pour la vision stéréo.

3. Calibrage des cameras

Étant donné que l'acquisition de la caméra et de tout le matériel nécessaire a pris plus de temps que ce qui avait été initialement prévu dans le planning, les responsables de l'étude technique se sont penchés sur le calibrage de la caméra. En effet, cela consiste à choisir un modèle géométrique de cette dernière et à en déterminer les paramètres, en vue de retrouver les coordonnées des points de la scène tridimensionnelle observée à partir des coordonnées des points de l'image bidimensionnelle prise par la caméra pour un éventuel traitement vidéo exploitant ces informations.

La démonstration mathématique étant assez spécifique et un peu longue, elle est mise à disposition, pour consultation, en annexe n°1.

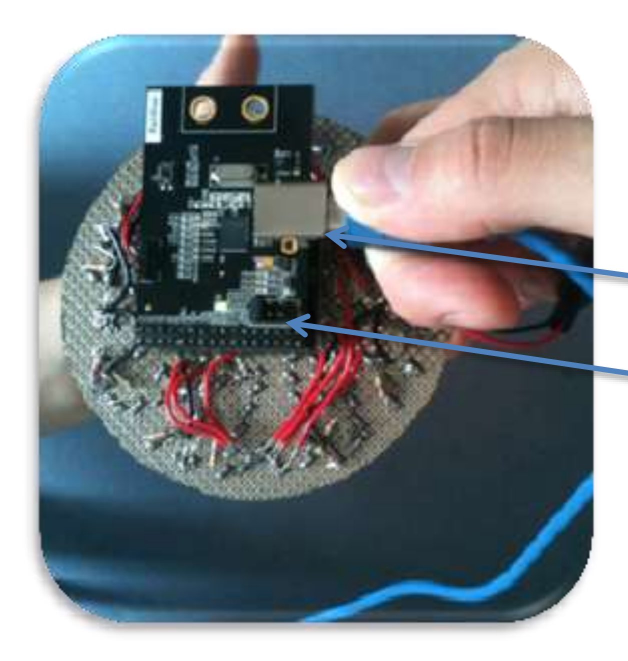
4. Tests préliminaires

Pour évaluer les besoins précis dans le traitement de la vidéo fournie par la caméra avant l'affichage sur l'écran de la tablette il est nécessaire d'effectuer des tests. On dispose pour cela du matériel suivant :

- capteur CMOS OV7675 d'OmniVision (fourni par Z–Innov),
- CD des pilotes informatiques du capteur (fourni par Z–Innov),
- LED infrarouges (fourni par l'IRCAD),
- transformateur 9 V pour l'alimentation des LED (acheté nous-même).

Nous ne disposions pas encore de la caméra et du système d'émission infrarouge définitifs. Nous avions l'intention de tester le matériel sur différentes parties du corps et différentes pigmentations de peau pour observer des résultats et tirer certaines conclusions de ces tests.

Cependant, dans la figure ci-après, sont présentés le matériel disponible et ce que nous espérions obtenir rapidement, après réglages du logiciel et obtention de LEDs émettant dans le domaine infrarouge (780-950nm) optimal pour la visualisation.



Transmission par USB

Caméra OV7675

Figure 7 : Matériel à disposition pour les tests préliminaires

Rampe de LEDs infrarouges

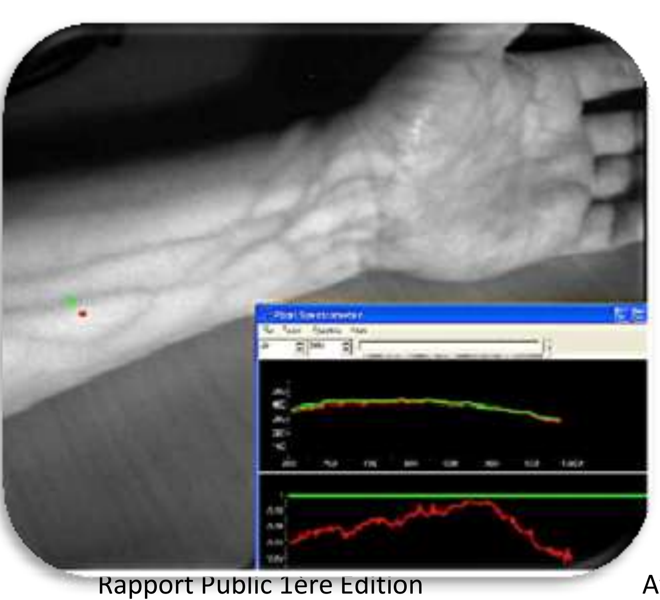


Figure 8 : Résultat espéré rapidement

III. Etude juridique

1. Normes de transfert de données

La connaissance des différentes normes de communication sans fil s'inscrit dans le cadre d'une volonté de nos clients de disposer d'un moyen de transfert de données vidéo de la tablette vers un écran ou une station de contrôle et/ou enregistrement. Les problématiques d'intégration, de consommation d'énergie et d'efficacité durant le transfert sont au centre de l'étude. La norme Wi-Fi, le Bluetooth, le Wireless USB et la liaison infrarouge ont fait l'objet de l'étude. Cette dernière technique a néanmoins été abandonnée car elle nécessite une ligne de vision directe entre l'émetteur et le récepteur, ce qui n'est pas pratique, le praticien devant conserver une mobilité maximale. Le Wireless USB a quant à lui été abandonné à cause de raisons industrielles.

Nous avons donc mené une étude comparative entre le Bluetooth et la norme Wi-Fi qui nous a conduits à choisir la norme Wi-Fi pour une raison très simple : le Bluetooth profite d'un débit trop faible – de l'ordre de 3Mbps - pour transférer un fichier vidéo d'une plateforme à une autre.

La norme Wi-Fi est un ensemble de protocoles de communication sans fil dont le réseau permet de relier plusieurs appareils informatiques à un réseau informatique. Les liaisons sans fil utilisent des ondes électromagnétiques sur une bande de fréquences dite ISM (Industrielle, Scientifique, Médicale) de 2.4 à 2.4835 GHz. Le transfert de données de l'émetteur au récepteur s'effectue avec un taux de transfert de 450 Mbits/s et un émetteur classique a une portée d'une centaine de mètres.

Pour exemple, le Wi-Fi met environ 28 minutes pour transférer 4Go de données tout en consommant 7% de l'énergie fournie par la batterie de l'émetteur soit une consommation moyenne de 228MW/h.

Une discussion avec nos clients ainsi qu'un approfondissement de l'étude des évolutions de cette norme nous a conduit à nous intéresser à la dernière norme : la norme 802.11n ou le n Wi-Fi. Ce standard nous permet en théorie d'atteindre un débit de transfert de 600Mbps (plus de 300Mbps en pratique) avec une multiplication par cinq de la bande passante des versions antérieures, ceci étant possible grâce à un système d'entrées et sorties multiples (MIMO ou Multiple Input Multiple Output) afin de sommer les signaux émis ainsi qu'à une technique de focalisation du signal par création d'interférences constructives pour l'amplifier. Nous pouvons également noter que cette nouvelle évolution est compatible avec l'existant, autrement dit les clients des normes antérieures pourront bénéficier de cette amélioration. Les nouvelles applications visées par cette évolution sont en particulier destinées à la vidéo qui va demander de plus en plus de capacité et de qualité à l'infrastructure radio. C'est un besoin notamment dans le domaine de l'imagerie médicale.

2. Règlementations sur les dispositifs médicaux

Avant d'étudier précisément les normes juridiques, il a fallu définir exactement le produit afin de savoir à quel type de famille il appartient. Le produit est un dispositif médical, à savoir, un

instrument utilisé sur le corps humain à des fins médicales qui n'est pas implantable dans le corps humain et dont l'objectif est d'étudier l'anatomie du patient. Une importante question s'est posé à ce moment précis : le dispositif constitue-t-il un outil de diagnostic ? Ou alors seulement une aide pour le chirurgien ? En effet, selon les applications, les normes sont très différentes. Les clients ont spécifié qu'il s'agissait seulement d'une aide, ce qui réduit considérablement les normes à respecter, notamment concernant la maintenance.

Les premières recherches reposèrent sur le code de la santé publique, ainsi que la législation et la réglementation applicables au bloc opératoire. Cette législation stipule que tous systèmes utilisés à des fins médicales doivent respecter des règles de compatibilités techniques définies par l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Produits de Santé (AFSSAPS). Cette agence s'assure que les contraintes sanitaires sont respectées pour les dispositifs mis sur le marché.



Ainsi, pour réaliser notre tablette, il va falloir se référer aux règles de cette Agence et respecter les normes européennes concernant la sécurité. De plus, il est indispensable de respecter les normes de compatibilité électronique et se référer à la norme IEC 60601 qui est en cours d'acquisition, donc bientôt à disposition de l'équipe.

Chapitre 3 : Conception et Prototypage

I. Expérimentations

1. Le matériel



Figure 9 : matériel pour les tests approfondis

- Camera vision nocturne KAM 301
- Carte d'acquisition vidéo USB UPG306 de UPMOST
- Adaptateur coaxial – Composite
- Câble composite
- Ordinateur
- Transformateur 9V

Après une étude technique et des premiers tests préliminaires concluants nous avons pu lancer la phase des tests de notre projet. Celle-ci a été rendue possible grâce aux différents matériels que nous nous sommes procurés. Premièrement, la caméra et le projecteur de LED infrarouge forment un composant 2 en 1 : la caméra équipée vision nocturne KAM 301. Elle permet d'éclairer la peau à une longueur d'onde de 850 nm grâce à une couronne de LED autour de la caméra qui, elle, capte les rayons réfléchis. Cet appareil 2 en 1 nous a été d'une grande utilité autant pour sa facilité d'utilisation que pour sa compatibilité entre la longueur d'onde des LED et le spectre d'absorption de la caméra. Il a cependant été nécessaire de contourner quelques difficultés de connectique. En effet

la sortie de la camera est en BNC (coaxiale) donc analogique or nous voulons pouvoir la brancher en USB sur un ordinateur ou une tablette, donc numérique. Nous avons choisi d'utiliser une carte d'acquisition vidéo USB : UPG306 de UPMOST fournie par l'IRCAD. Cette carte a une entrée composite et une sortie USB. La liaison BNC-composite a été faite à l'aide d'un simple adaptateur. Nous avons aussi dû faire attention à la perte de signal le long de ces différentes connectiques pour être sûr d'avoir en sortie une image réelle. Cette caméra reliée en USB à un de nos ordinateurs a été notre premier prototype fonctionnel avec lequel nous avons réalisé plusieurs séries de tests.

2. Tests de validation

A ce stade, notre premier objectif est de valider nos hypothèses : choix de la longueur d'onde et du spectre de la caméra. Nos premiers tests avaient donc pour but de valider ces choix ainsi que le matériel acquis en suivant un protocole (voir **Annexe 3**). Voici les premiers clichés obtenus :





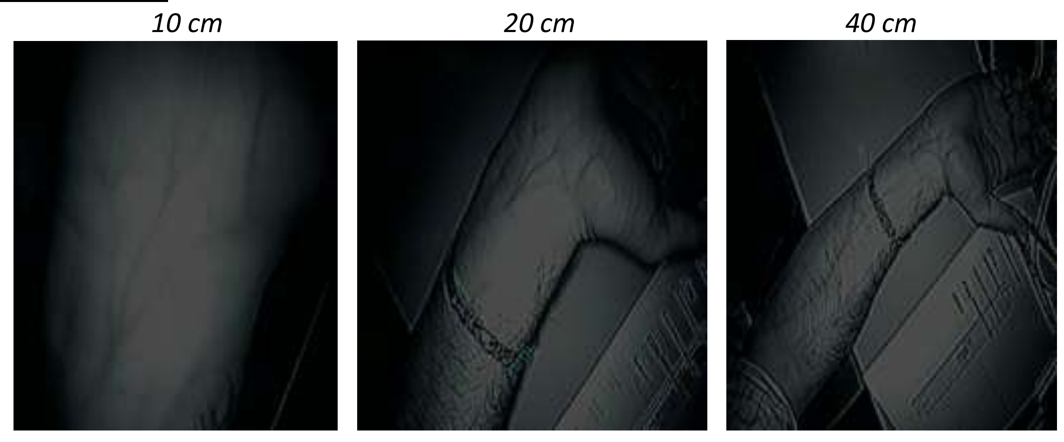
Ces premiers essais furent concluants puisqu'effectivement la combinaison d'un rayonnement à 850 nm et une caméra proche infrarouge nous a permis d'observer les vaisseaux sanguins du bras.

3. Tests d'approfondissement

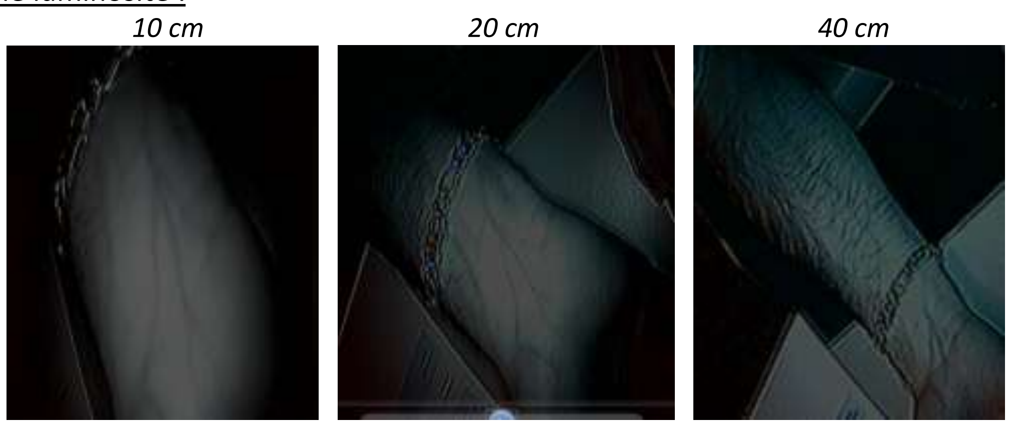
a. Détermination des paramètres optimaux

La première phase des tests approfondis a consisté à déterminer les paramètres pratiques permettant d'obtenir le meilleur résultat visuel, c'est-à-dire, observer le plus nettement les vaisseaux sanguins. Pour cela, nous avons fait varier la luminosité puis la distance entre la peau et l'objectif de la caméra (Quelques exemples pour une moyenne luminosité. Nous avons observé des différences au niveau du contraste et de la précision (netteté) des images.

Faible luminosité :



Moyenne luminosité :



Forte luminosité :



Nous avons regroupé les résultats qualitatifs de cette première phase de tests dans le tableau Figure 10.

	Distance 10 cm	Distance 20 cm	Distance 40 cm
Luminosité forte	Contraste : + Précision : +++	Contraste : + Précision : ++	Contraste : ++ Précision : +
Luminosité moyenne	Contraste : + Précision : +++	Contraste : ++ Précision : ++	Contraste : +++ Précision : +
Luminosité faible	Contraste : + Précision : +++	Contraste : ++ Précision : ++	Contraste : +++ Précision : +

Figure 10 : premiers résultats qualitatifs

Les premières conclusions de cette phase de tests sont :

- La distance optimale entre la peau et l'objectif de la caméra est : 15-20 cm.
- La variation de la luminosité influe très peu.
- Les paramètres d'acquisitions et qui sont les optimaux sont : Luminosité=12 ; contraste = 40.

Globalement, nous avons obtenus des résultats très satisfaisants. Nous visualisons nettement les vaisseaux sanguins.

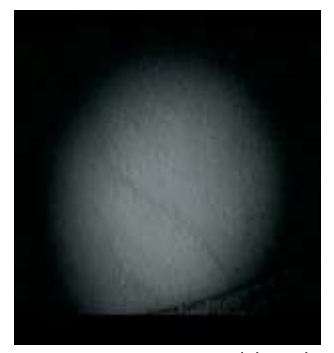
b. Tests sur différentes parties du corps et différentes peaux

Ayant déterminés les paramètres d'acquisitions optimaux, nous avons ensuite testé notre dispositif sur différentes parties du corps : bras, main, ventre, cou et pied ; et sur deux types de peau : une peau blanche et une peau noire.

Nous avons tout d'abord réalisé des tests sur un bras avec une peau noire. Nous avons également pu observer nettement les vaisseaux sanguins, et même de façon encore meilleure qu'avec une peau blanche. En effet, il y a moins de réflexion du rayonnement IR sur la peau. Pour obtenir la meilleure image possible, nous avons dû changer les paramètres de logiciel d'acquisition : la luminosité étant au minimale et le contraste quasiment aux maximale.


Bras avec peau noire

Ensuite, nous avons fait des tests sur différentes parties du corps telles que le bas du ventre, le cou et le pied.


Bas-ventre - peau blanche

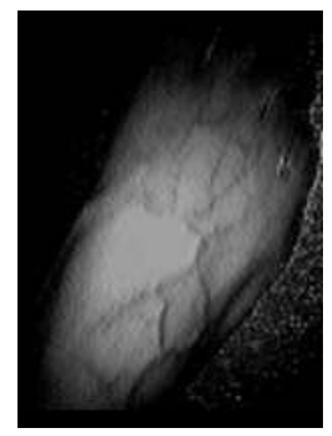

Bas-ventre - peau noire

Sur le bas du ventre, nous ne sommes pas parvenus à visualiser parfaitement les vaisseaux sanguins sous-cutanés. En revanche, nous avons pu en localiser quelques-uns et retracer leur parcours.


Cou - peau blanche


Cou - peau noire

Sur le cou, les vaisseaux sanguins apparaissent moins nettement que sur le bras, mais plus nettement que sur le torse. Ce sont des clichés encourageants, notamment sur la peau noire.



Cou - peau noire

Concernant les clichés du pied, ils sont, comme pour les bras, extrêmement concluant puisqu'on voit apparaître nettement les vaisseaux sanguins.

Cette deuxième phase des tests a été globalement satisfaisante puisque nous sommes parvenus à faire apparaître les vaisseaux sanguins sur plusieurs parties du corps, et notamment sur le ventre, la partie qui nous intéresse le plus, même si l'apparition des veines fut discrète.

Nous regrettons de ne pas avoir faire des enregistrements en 720x480, mais seulement en 480x480, le logiciel d'acquisition de nous ne permettant pas d'enregistrer avec cette extension. De plus, en paramétrant la luminosité à son minimum et le contraste à son maximum, il y a eu une très forte pixellisation de l'image, ce qui est un problème, notamment pour les futurs traitements d'images.

Enfin, nous avons également pu confirmer que la luminosité extérieure influait peu sur les clichés, ce qui est une bonne chose puisque le futur milieu d'utilisation du produit est le bloc opératoire. Cependant, le problème de la trop forte puissance des LEDS, faisant apparaître un halo sur l'image, demeure toujours. Nous devons réaliser d'autres tests en intercalant une feuille de papier calque afin de diminuer l'amplitude du rayonnement infrarouge.

Principal problème rencontré : la trop forte puissance d'émission des LEDS. Le rayonnement infrarouge étant fortement réfléchi sur la peau, un halo masque l'image capturée par la caméra. Afin d'obtenir une image correcte, nous avons dû jouer avec les paramètres de contraste et de luminosité du logiciel d'acquisition.

c. Réduction de l'éclairement des LEDS

Cette troisième phase de tests approfondis a été réalisé dans l'unique but de savoir si en positionnant une feuille de papier calque devant les LEDS, la puissance d'émission étant atténuée, nous pourrions faire disparaître le halo très gênant, et donc, d'avoir une encore meilleure observation des veines sur le corps.

Sans papier calque



Avec papier calque



L'atténuation de la puissance d'émission des LEDS via une feuille de papier calque a amélioré la qualité de nos clichés. En effet, il y a moins de lumière réfléchie par la peau, et nous sommes parvenus à observer les veines avec moins de difficultés puisque nous n'étions plus gênés par le halo présent précédemment. De plus, les clichés obtenus sur le ventre sont plus encourageants puisque sans halo, nous pouvions mieux observer les veines.

La conclusion de cette phase de test est qu'en apportant un faisceau de rayonnement infrarouge avec une puissance adaptée, nous pouvons obtenir de très bons clichés en visualisant nettement les vaisseaux sanguins.

4. Tests cliniques



Objectifs

Ayant obtenu des résultats plus ou moins satisfaisants (sans traitement) avec une caméra proche IR et des LED de longueur d'onde préalablement choisie, notre objectif est désormais de pousser l'étude en situation réelle. Nous pourrons ainsi étudier les acquisitions au bloc sur un patient dont la peau de l'abdomen est tendue et tenter de prouver la faisabilité opérationnelle.

Matériel

Nous utilisons le même matériel que lors de la précédente campagne d'essais, à savoir :

- Capteur CMOS OV7675 d'OmniVision (fourni par Z–Innov) – non utilisée
- CD des pilotes informatiques du capteur (fourni par Z–Innov)
- LED infrarouges (fournies par l'IRCAD) – non utilisées
- Transformateur 9V pour l'alimentation des LED (acheté nous-même)
- Caméra de vidéosurveillance avec source IR intégrée

1ère séance d'acquisition

Nous avons eu l'occasion d'effectuer des acquisitions sur deux patientes : l'une obèse, se faisant opérer pour un pontage gastrique et l'autre pour une ablation du pancréas, de corpulence « standard ».

Nous avons intégré les blocs opératoires en tenue de bloc, avec notre matériel lors de la phase de préparation des patientes par les infirmiers, infirmiers anesthésistes et assistants. Avant insufflation - insertion du gaz pour gonfler la paroi abdominale, nous avons placé la caméra de vidéosurveillance dans une poche stérile et avons laissé l'assistant chirurgien la manipuler au-dessus de l'abdomen de la patiente afin de mettre en évidence les vaisseaux environnant l'artère épigastrique.

Il est important de noter que les acquisitions ont été effectuées :

- Sans insufflation
- En présence de Bétadine sur la peau des deux patientes (solution antiseptique)

Résultats

Analysons le cas de la première patiente, atteinte d'obésité. Le chirurgien a mis en évidence une couche graisseuse de 5 cm d'épaisseur qui n'est pas ou peu irriguée. De ce fait, nous n'avons pas pu observer de vaisseau sanguin sous-cutané mais seulement les vergetures.

Clichés pris sur la première patiente avec la caméra dans le proche IR :



Abdomen, en présence de Bétadine



Abdomen, en présence de Bétadine et après insertion des trocarts – Caméra sous manchon stérile

Nous avons tiré la conclusion que la visualisation n'est pas possible sur un patient corpulent.

Concernant la deuxième patiente, elle était beaucoup moins corpulente ce qui nous a permis de visualiser les vaisseaux sans problème.

Clichés pris sur la deuxième patiente avec un appareil photo numérique (Samsung Galaxy)





Les vaisseaux sanguins ne sont sensiblement pas visibles à l'œil nu, contrairement à une visualisation sous une lumière infrarouge.

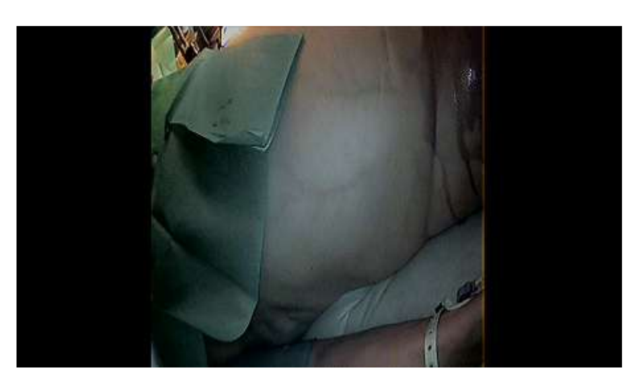
<u>Clichés pris sur la deuxième patiente avec la caméra dans le proche IR</u>



<u>Abdomen sans Bétadine</u>



Abdomen avec Bétadine



Abdomen avec Bétadine

2ème séance d'acquisition

La deuxième séance d'acquisition s'est déroulée avec le même matériel que précédemment sur un patient de corpulence standard.
L'objectif de cette séance était d'effectuer une série de cliché sur ventre insufflé.

Nous avons eu un problème de visualisation à cause d'un scotch disposé sur l'abdomen. Ce scotch a pour utilité de renforcer la zone d'insertion des trocarts, de garder la surface à une température accrue, de pouvoir dessiner sur le corps du patient sans laisser de trace et enfin d'accroitre la stérilité sur la peau.

Nous avons obtenu les clichés suivants :



Abdomen avec Bétadine sans le scotch



Abdomen avec Bétadine avec le scotch

Ceci étant, les tests nous ont permis de valider la faisabilité technique du concept, à savoir visualiser les vaisseaux sanguins sous-cutanés. Désormais, nous souhaitons effectuer des traitements sur les clichés obtenus afin d'ajouter une valeur ajoutée : l'optimisation de la visualisation ainsi que la réalité augmentée.

II. Traitement d'images

La caméra ayant permis l'acquisition d'images numériques, il faut maintenant les traiter pour en extraire l'information intéressante pour le chirurgien : les *vaisseaux sanguins*.

Nous écrivons pour cela un programme informatique en langage *C* exploitant la bibliothèque libre de traitement d'images *OpenC.V.* (Open Computer Vision Library).

Il s'agit d'effectuer un traitement numérique en temps réel d'un flux vidéo de caméra pour améliorer la visibilité des vaisseaux sanguins.

1. Augmentation du contraste et des nuances

Pour aboutir au programme final de notre projet, nous avons travaillé sur l'augmentation du contraste et des nuances en développant un premier programme. Nous avons écrit ce premier programme en *C* et en utilisant la bibliothèque *OpenC.V.* Il est une interface pouvant traiter :
— des images;
— des vidéos ;
— des flux de webcam,
en leur appliquant des traitements quelconques (il est modulaire).

Nous y avons codé 2 traitements pour améliorer l'image :
— un qui augmente le contraste ;
— un autre qui augmente les nuances.

a. Contenu

Dans le répertoire « augmentation_du_contraste_et_des_nuances », on trouve:
— les fichiers sources ;
— le fichier de compilation ;
— le fichier binaire ;
— le fichier image de Lena original ;
— les fichiers images de Lena traités par mon programme ;
— les fichiers images des veines pris par Guillaume originaux ;
— les fichiers images des veines pris par Guillaume traités par mon programme.

b. Fonctionnement

Notions de colorimétrie.

Pour représenter les couleurs distinguées par la vision humaine, il existe plusieurs systèmes, notamment :
— le système *R.-V.-B.* ou *R.-G.-B.* (*Rouge-Vert-Bleu* ou *Red-Green-Blue*), un système *naturel* car décrivant ces couleurs par 3 paramètres correspondants aux 3 types de cônes de la rétine de l'œil humain recevant *de l'extérieur* la lumière et générant 3 courants électriques ;
— le système *T.-S.-L.* ou *H.-S.-L.* (*Teinte-Saturation-Luminosité* ou *Hue-Saturation-Lightness*, la teinte étant la couleur pure, la saturation la pureté vis-à-vis du gris et la luminosité la pureté vis-à-vis du noir pour la première moitié et l'impureté vis-à-vis du blanc pour la seconde), un système *perceptuel* car décrivant ces couleurs par 3 paramètres correspondants aux 3 types de cellules ganglionnaires de la rétine de l'œil humain recevant les courants électriques des cônes et générant 3 courants électriques *vers le cerveau*.

Ce dernier système est très pratique lorsque l'on souhaite agir uniquement sur la luminosité

d'une image.

Le programme peut appliquer un traitement quelconque sur une ou plusieurs couches de l'image (une couche d'une image étant la même image avec deux des trois paramètres représentant la couleur des pixels mis à 0 pour tous les pixels de l'image).

Égalisation de l'histogramme.

Le programme effectue une *égalisation* (ou *equalization*) *de l'histogramme* (c'est-à-dire une expansion de la dynamique et une uniformisation de la luminosité : cela augmente le contraste et les nuances) de la couche de l'image à traiter.

Étirement de l'histogramme.

Le programme peut également effectuer un *étirement* (ou *stretching*) *de l'histogramme* (c'est-à-dire une expansion de la dynamique : cela augmente le contraste). La différence avec l'égalisation de l'histogramme est que l'égalisation effectue non seulement un étirement de l'histogramme, mais en plus son uniformisation (c'est-à-dire le rend constant si l'histogramme initial est continu, à peu près constant s'il est discret, ce qui est notre cas). Si on essaye d'appliquer un étirement d'histogramme à une image qui a déjà subi une égalisation d'histogramme on ne voit donc aucune différence.

c. Résultats

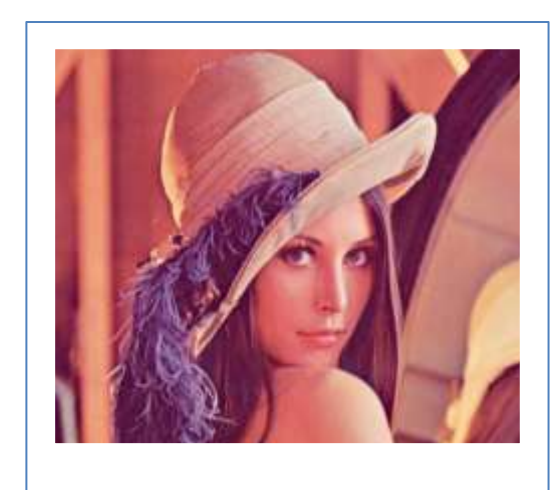
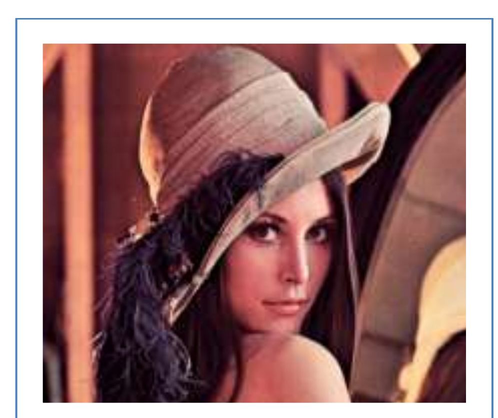


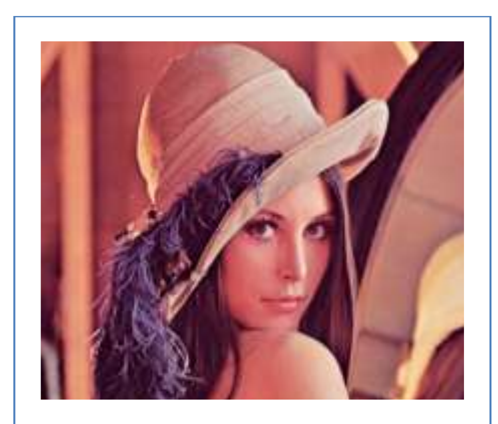
Image de Lena originale



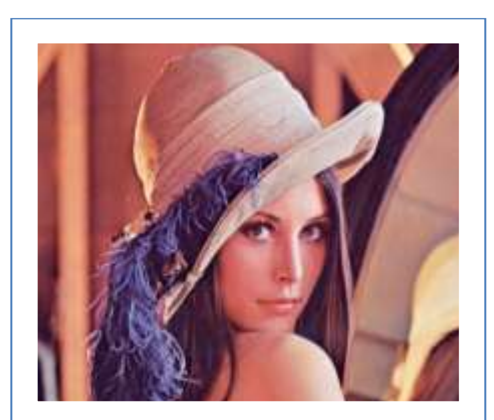
Égalisation de la couche luminosité



Égalisation des couches rouge, verte et bleue



Étirement de la couche luminosité



Étirement des couches rouge, verte et bleue



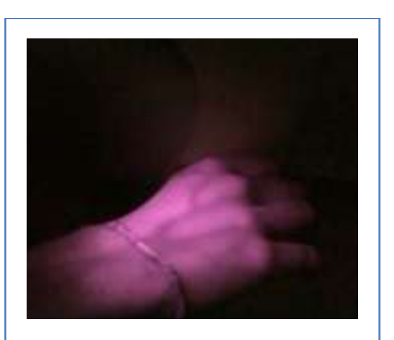
Image des veines originale



Égalisation de la couche luminosité



Égalisation des couches rouge, verte et bleue



Étirement de la couche luminosité



Étirement des couches rouge, verte et bleue

d. Analyse

Les images que nous avons obtenues augmentent clairement le contraste et les nuances de l'image originale, et ce de manière plus ou moins réussie.

On constate déjà une différence importante entre les images qui ont subi un traitement sur leur couche luminosité avec celle qui ont subi un traitement sur leurs couches rouge, verte et bleue : les couleurs sont altérées dans le second cas.
On constate aussi une dégradation de l'image lors de l'égalisation de l'histogramme, qui n'apparaît pas lors d'un simple étirement. Mais on s'y attendait puisque l'égalisation en plus d'étirer l'histogramme l'aplatit en mettant toutes ses valeurs à peu près au même niveau (uniformisation) : le bruit de l'image originale se retrouve amplifié. C'est particulièrement visible sur les deux clichés des veines.

Comme nos images sont assez bruitées, *on utilisera pour notre projet plutôt l'étirement d'histogramme que l'égalisation d'histogramme*.

2. Détection de contours

La détection de contours est l'action de repérer les points d'une image correspondant à un changement brutal d'intensité. En effet, en niveau de gris, un contour est caractérisé par un changement de la valeur du pixel. Le but de l'opération est d'obtenir les informations structurelles importantes de l'image tout en supprimant les informations moins pertinentes pour une application donnée.

Notre but était d'obtenir le contour des veines afin de pouvoir leur appliquer un algorithme de réalité augmentée de manière optimale.

Ce faisant, nous avons mené une première étude : la méthode de recherche des extremums de la dérivée première ou maximums locaux de l'intensité du gradient. Nous avons ainsi testé les filtres de Canny, Sobel et Prewitt.

a. Filtre de Sobel

Pour faire simple, l'opérateur calcule le gradient de l'intensité de chaque pixel. Ceci indique la direction de la plus forte variation du clair au sombre, ainsi que le taux de changement dans cette direction. On connaît alors les points de changement soudain de luminosité, correspondant probablement à des bords, ainsi que l'orientation de ces bords.

Le gradient dans une zone d'intensité constante est donc nul. Au niveau d'un contour, le gradient traverse le contour, des intensités les plus sombres aux intensités les plus claires.

Puisque l'intensité d'une image numérique est discrète, les dérivées de cette fonction ne peuvent pas être définies si ce n'est sous une hypothèse de continuité de la fonction intensité continue qui a été échantillonnée. En pratique on peut calculer des approximations plus ou moins fidèles du gradient en chaque point.

En effet, il n'utilise qu'un voisinage (généralement de taille 3×3 soit 8 points) autour de chaque point pour calculer le gradient.

b. Filtre de Canny

Le filtre de Canny est utilisé en traitement d'images pour la détection des contours. Sa mise en œuvre est la suivante :

- Réduction du bruit

La première étape est de réduire le bruit de l'image originale avant d'en détecter les contours. Ceci permet d'éliminer les pixels isolés qui pourraient induire de fortes réponses lors du calcul du gradient, conduisant ainsi à de faux positifs.

- Gradient d'intensité

Après le filtrage, l'étape suivante est d'appliquer un gradient qui retourne l'intensité des contours.

Nous obtenons finalement une carte des gradients d'intensité en chaque point de l'image accompagnée des directions des contours.

- Suppression des non-maximas

La carte des gradients obtenue précédemment fournit une intensité en chaque point de l'image. Une forte intensité indique une forte probabilité de présence d'un contour. Toutefois, cette intensité ne suffit pas à décider si un point correspond à un contour ou non. Seuls les points correspondant à des maxima locaux sont considérés comme correspondant à des contours, et sont conservés pour la prochaine étape de la détection.

Un maximum local est présent sur les extrema du gradient, c'est-à-dire là où sa dérivée s'annule.

- Seuillage des contours

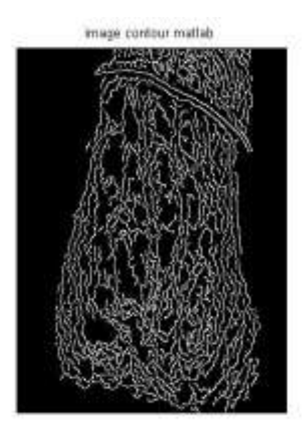
La différenciation des contours sur la carte générée se fait par seuillage à hystérésis.

Cela nécessite deux seuils, un haut et un bas; qui seront comparés à l'intensité du gradient de chaque point. Le critère de décision est le suivant. Pour chaque point, si l'intensité de son gradient est :

  - Inférieur au seuil bas, le point est rejeté ;
  - Supérieur au seuil haut, le point est accepté comme formant un contour ;
  - Entre le seuil bas et le seuil haut, le point est accepté s'il est connecté à un point déjà accepté.

Une fois ceci réalisé, l'image obtenue est binaire avec d'un côté les pixels appartenant aux contours et les autres.

Ceci étant, les résultats de cette approche de détection n'étaient pas satisfaisants et similaires à ce cliché pour les trois filtres (tests effectué sous Matlab) :



Nous avons donc privilégié l'approche de détection avec des opérateurs de morphologie mathématique et plus particulièrement de l'opérateur *top-hat*.

La transformée Top-hat est une opération en morphologie mathématique qui vise à extraire des petits éléments ou détails d'une image. Il existe deux approches :

- Transformée White Top-hat définie comme étant la différence entre l'image d'entrée et son ouverture par un élément structurant. Cette approche retourne les objets plus petits que l'élément structurant et plus clairs que les points environnants.
- Transformée Black Top-hat définie comme étant la différence entre la fermeture d'une image et son entrée. Cette approche retourne les objets plus petits que l'élément structurant et plus sombres que les points environnants.

C'est cette transformée que nous avons exploitée, les veines étant plus sombres que les tissus.

La largeur ou taille de l'élément structurant est réglable à la guise de l'utilisateur. Plus il est gros, plus gros peuvent être les détails à extraire.

La théorie de l'opérateur et les résultats obtenus par cette approche sont largement couverts dans la partie *Chaine de traitement opérationnelle*.

3. Chaîne de traitement opérationnelle

Finalement, après cette familiarisation avec les outils informatiques de traitement d'images numériques Matlab et OpenC.V. et les différents tests effectués sur les images capturées par la caméra, nous avons abouti à une chaîne de traitement d'images de 8 opérations image → image successives pour atteindre notre objectif d'amélioration de la visibilité des vaisseaux sanguins :

a) filtrage par la moyenne ;
b) égalisation d'histogramme adaptative ;
c) fermeture morphologique ;
d) différence (fermeture morphologique – égalisation d'histogramme adaptative) ;
e) seuillage ;
f) ouverture morphologique ;
g) squelettisation morphologique ;
h) superposition (amincissement morphologique sur image originale).

4. Mise en oeuvre

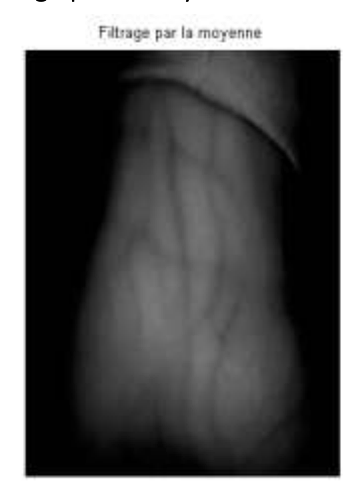
Nous illustrons le traitement sur l'image ci-dessous issue de la caméra.



a. Filtrage par la moyenne

Dans un premier temps, nous réduisons le bruit par un filtrage par la moyenne.

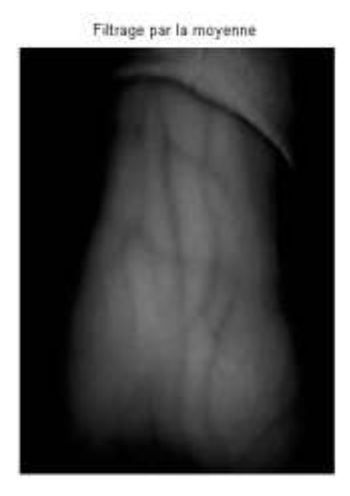




b. Égalisation d'histogramme adaptative

Nous augmentons ensuite le contraste de l'image par une égalisation d'histogramme adaptative.

Filtrage par la moyenne



Égalisation d'histogramme adaptative



c. Fermeture morphologique

Nous utilisons une fermeture morphologique pour supprimer les vaisseaux sanguins afin de les isoler.

Égalisation d'histogramme adaptative



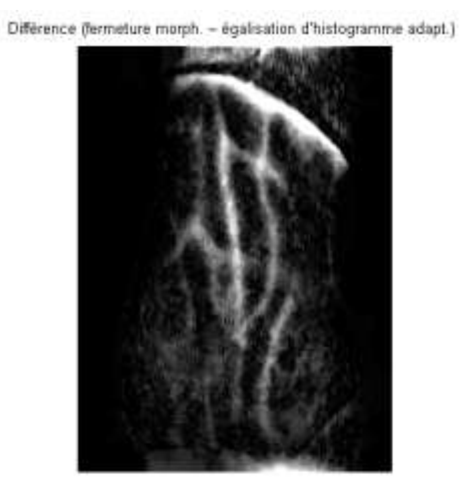
Fermeture morphologique



d. *Différence (fermeture morphologique – égalisation d'histogramme adaptative)*

Puis nous soustrayons à la fermeture morphologique l'égalisation d'histogramme adaptative.





e. *Seuillage*

Les vaisseaux sanguins isolés, nous transformons l'image en noir et blanc par un seuillage.





f. Ouverture morphologique

Nous supprimons les artefacts par une ouverture morphologique.





g. Squelettisation morphologique

Nous réduisons les vaisseaux sanguins à un ensemble de courbes par squelettisation morphologique.





h. Superposition (squelettisation morphologique sur image originale)

Enfin, nous superposons l'ensemble de courbes obtenu sur l'image originale et atteignons notre but.





Ayant abouti à un traitement efficace de nos images, l'objectif est désormais de l'intégrer sous forme d'un logiciel sur le prototype.

III. Prototype

1. *La tablette*

Notre prototype comporte l'ensemble de nos programmes de traitement d'images implémentés sur une tablette tactile qui a pour but de rendre notre dispositif portable dans la salle d'opération pour que le chirurgien puisse l'utiliser en temps réel. Le but est toujours d'atteindre un prototype le plus efficace possible. Ainsi, avec cette tablette, le chirurgien ne sera pas obligé de tourner la tête pour vérifier qu'il ne coupe pas de veines sur un écran placé à côté du patient, mais il pourra directement insérer les trocarts en observant le ventre du patient à travers la tablette.

L'ensemble du matériel nous a été fourni par M. Luther de l'entreprise Z-INNOV. Il nous l'a livré en pièces détachées : un écran, une carte électronique et un module caméra.

La caméra est une OV5642 à cinq mégapixels. Elle pourrait convenir à notre application d'après les courbes d'absorption de cette caméra. Malheureusement, cette dernière possède un filtre infrarouge, elle ne sera donc pas utilisable pour notre application. Nous devrons donc continuer à utiliser pour notre prototype la caméra nocturne branchée en USB.

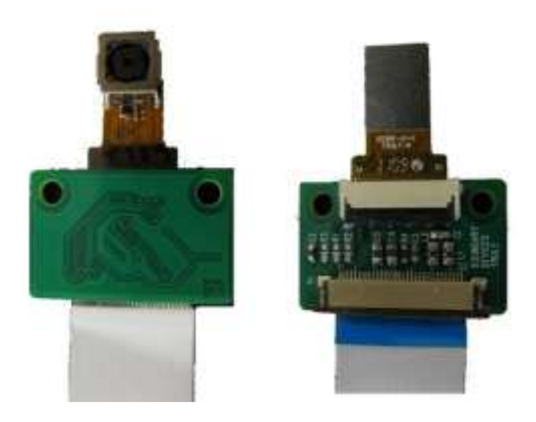


Figure 11 : Caméra OV5642

La carte est une iMX6Quad fonctionnant sous Linux ou Android. Elle possède un processeur Quad-Core ARM Cortex A9 à 1GHz et deux ports caméra. Cette carte pourrait donc être éventuellement adaptée à l'application stéréoscopique prévue au départ du projet. Elle a trois ports d'affichage (RVB, LVDS et HDMI). C'est cette carte qui permet de faire fonctionner la tablette et nos traitements sur les vidéos en temps réel grâce à sa puissance de calcul.



Figure 12 : Carte iMX6Quad

Enfin, l'écran est un écran Nit6X sept pouces 1024*600, qui est compatible avec la carte précédente. Il servira à afficher nos vidéos.



Figure 13 : Écran Nit6X 1024*600

Pour l'instant, nous branchons notre caméra nocturne sur l'écran et la carte mais le but à terme serait d'avoir une caméra directement implantée sur la tablette, voire deux pour une vision stéréoscopique puisque la carte y est adaptée.

2. Le logiciel de traitement d'images

Pour améliorer la qualité de nos images puis détecter les veines en temps réel, nous avons utilisé la bibliothèque OpenCV. L'utilisation de cette bibliothèque était une contrainte de la part de nos clients, qui travaillent régulièrement avec cette bibliothèque. La récupération de notre travail et la possible poursuite de celui-ci en seront donc facilitées pour eux.

OpenCV (Open Computer Vision) est une bibliothèque graphique libre distribuée sous licence BSD. Cette licence permet aux utilisateurs de pouvoir réutiliser tout ou partie du logiciel sans restriction. Cette bibliothèque a d'abord été développée par Intel. Elle peut servir à faire du traitement d'images, de vidéos, à écrire des algorithmes d'apprentissage ou à faire du calcul matriciel.

Nous avons donc accès à de nombreuses fonctions permettant de traiter les images. Par exemple on peut créer et nommer une nouvelle fenêtre (cvNamedWindow), puis charger une image (cvLoadImage) et enfin l'afficher (cvShowImage). On peut copier une image (cvCloneImage). On peut aussi réaliser des opérations morphologiques comme la dilatation ou l'érosion par exemple (cvDilate et cvErode) en choisissant la forme de l'élément structurant (carré, ellipse,…) et sa taille (cvCreateStructuringElement). On peut additionner ou soustraire les valeurs des pixels de deux images (cvSub). À la fin de chaque programme, on libère la mémoire en détruisant les fenêtres (cvDestroyWindow), les images (cvReleaseImage) et les éléments structurants (cvReleaseStructuringElement). Il y a également des fonctions de filtrage d'image (creategaussianFilter par exemple, cvSobel,…), de lissage (cvSmooth),… On peut aussi trouver des fonctions annexes, comme la création d'une barre de défilement (cvCreatetrackbar).

Ainsi, cette bibliothèque nous a donné tous les outils nous permettant de traiter efficacement les images fournies par la caméra.

3. Ouverture à la stéréoscopie

La stéréovision est un processus de reconstitution de profondeur d'images ou de films en comparant deux vues différentes minimum. Dans le cas de notre application, nous avions prévu d'avoir en notre possession deux caméras. Cependant, il nous a fallu abandonner ce projet pour cause de manque de temps. En effet, le retard de livraison de la tablette nous a forcés à nous concentrer sur l'intégration hardware à une seule caméra.

Malgré cela, nous avons décidé de mener une rapide étude sur le fonctionnement de la stéréoscopie, et une méthode de reconstruction qui pourrait permettre de visualiser en 3D le réseau sanguin du patient.

1. Calibrage des caméras
2. Lecture de la paire d'images
3. Le *Block Matching* : Pour chaque pixel dans l'image de droite, on extrait un bloc de *n* sur *n* pixels autour de lui et on cherche la ligne dans l'image de gauche pour le bloc le plus ressemblant.
4. *Sub-pixel estimation* : Il faut à présent procéder à une opération de lissage de l'image pour régler le problème de transition entre les blocs.
5. Reconstruction par triangulation.

Malgré le regret évident de ne pas avoir pu implémenter cette méthode par manque de temps, nous avons cependant mis en valeur lors de nos recherches sur cette partie le grand intérêt que pourrait représenter cela pour l'application future.

Chapitre 4 : Le livrable

I. Livrables intermédiaires

Comme dit précédemment, le projet a été découpé en plusieurs modules plus ou moins indépendants afin de définir les livrables intermédiaires. Temporellement, ils correspondaient sensiblement aux dates de présentation ou de revue technique, nous en comptons cinq en y incluant la preuve de faisabilité et le livrable final.

Ces livrables avaient pour but de valider les étapes, de jalonner notre travail et surtout de gérer nos problèmes d'approvisionnement de la part de Sven Luther que nous décrirons dans le plan qualité. Nous nous sommes ainsi servis de ces livrables pour réajuster notre planning.

1. Visualisation des vaisseaux sanguins

Suite à l'achèvement de la preuve de faisabilité théorique, il a été question de démontrer la faisabilité technique du concept avec les spécifications du cahier des charges (éclairage infrarouge à 850nm, bruit lumineux et type de peau principalement). Ceci nous a amenés à effectuer une première campagne expérimentale en salle de classe avec une caméra de vidéosurveillance et une interface informatique fournies par Stéphane Nicolau de l'IRCAD.

La description et les résultats de cette campagne sont décrits dans la partie *Tests de validation* de ce présent rapport.

Ce livrable a été présenté avec succès lors de la présentation R3.

2. Traitement d'images sous OpenCV

Une fois le concept de visualisation des vaisseaux sanguins en lumière infrarouge validé, il nous a fallu écrire, tester et synthétiser en un logiciel des algorithmes de traitement d'images afin de pouvoir exploiter cette visualisation et répondre au cahier des charges.

En effet, bien que le résultat avec le matériel de tests ait été satisfaisant, il était impossible de s'affranchir de traitements, d'abord par souci visuel mais surtout par souci fonctionnel pour le chirurgien. Pour ce faire, nous avons étudié la chaine de traitement la plus optimale afin d'aboutir à un logiciel efficace et fiable. Le traitement d'images a également été primordial pour apporter la réalité augmentée au projet.

Nous avons débuté l'étude de traitement sous Matlab© afin d'exploiter rapidement les fonctions existantes sur nos clichés et nous faire une idée de ce qui était adapté ou non à notre problème. Ensuite, nous avons traduit ces algorithmes en C en utilisant les bibliothèques de OpenCV.

La démarche et les résultats sont décrits dans la partie *Traitement d'images* de la partie *Conception et prototypage.*

3. Intégration du logiciel sur la tablette

Une fois le logiciel écrit et validé, il a été question de le porter sur le prototype final, à savoir la carte d'acquisition fournie par Sven Luther au mois de Mars 2013.

II. Livrable final

Le 30 avril 2013 a lieu l'échéance finale du projet qui consiste à remettre le prototype à nos clients.

Celui-ci se composera du :

- Matériel (hardware) : la tablette PC reliée à un module caméra IR et à un écran permettant de visualiser les vaisseaux sanguins en réalité augmentée + le matériel d'alimentation et de liaison entre les modules
- Logiciel (software) : programme de traitement d'images porté sur la tablette écrit en C et utilisant les bibliothèques OpenCV + le programme sur CD

Notre livrable logiciel se compose de deux programmes informatiques écrits en langage *C* et exploitant la bibliothèque libre de traitement d'images *OpenC.V.* (Open Computer Vision Library) :

- le premier programme pour le chirurgien ouvrant directement le flux de la caméra de la tablette traité par nos algorithmes, c'est-à-dire mettant en évidence les vaisseaux sanguins quand une partie du corps du patient est filmée, et avec 3 paramètres réglables en temps réel par 3 curseurs situés dans un coin de l'écran pour améliorer la détection des vaisseaux ;
- le second programme identique au premier avec en plus une interface de lancement, permettant de choisir le type de données à traiter (image, vidéo ou flux de caméra), ainsi que la ou les couche(s) à traiter du mode R.-V.-B. ou T.-S.-L.

Notre livrable contient aussi les fichiers sources de ces programmes, et il est extensible : nous l'avons conçu de sorte que l'on puisse aisément rajouter des traitements supplémentaires à l'image.

III. Le mode d'emploi

Les différents composants du prototype final ayant déjà été présentés dans la partie précédente, il sera ici question du mode d'emploi de ce prototype.

- Dans un premier temps, il faut savoir que le prototype compte deux alimentations 230V à connecter au secteur. Celle du module caméra, et celle de la tablette (attention à ne pas oublier l'adaptateur pour la prise américaine).

- La mise sous tension de la tablette provoque l'éclairage de cette dernière. Il n'est pas demandé de mot de passe et nous sommes alors connectés directement sur le bureau du Linux Ubuntu 11.10 freescale.

- À l'aide du clavier, il faut à présent lancer le terminal.

- Afin de faciliter l'utilisation du prototype, un script bash a été implémenté directement. Pour lancer l'application, il suffit alors de taper dans le terminal la commande suivante : ***bash application.sh***

- L'application se lance, il ne reste plus au chirurgien qu'à tester différents paramètres grâce aux « trackbars » disposées en bas de l'image. Les paramètres sont préalablement réglés par défaut sur la solution qui nous semble optimale.

  Ces paramètres sont :

  1. La taille de l'ouverture pour le filtrage médian.

  2. La taille de l'élément structurant pour la fermeture morphologique

  3. La taille de l'élément structurant pour l'ouverture morphologique

Le but de ces curseurs est de permettre au praticien de modifier légèrement quelques paramètres afin d'optimiser la détection en fonction des conditions environnementales (éclairage, distance avec le patient, plus ou moins fort contraste des veines, etc.). Il est expliqué à la fin de cette partie le fonctionnement des trois curseurs.

La tablette est prête à être utilisée.

Nous avons également développé une version du programme avec une interface de lancement permettant de choisir le type de données à traiter : image, vidéo ou flux de caméra, ainsi que la ou les couche(s) à traiter du mode R-V-B ou T-S-L. Cette interface est différente de celle du chirurgien. Elle permet de faire une multitude de tests.

Dans l'optique d'une mise sur le marché du produit, nous avons imaginé une adaptabilité améliorée du software aux conditions environnementales comme un zoom, une mise au point et ajustement des paramètres automatiques.

Remarques :

1° Réglage de la glissière « taille de l'ouverture pour le filtrage médian » : modifie la sensibilité au bruit de la détection des vaisseaux sanguins

2° Réglage de la glissière « taille de l'élément structurant pour la fermeture morphologique » : modifie le degré de la détection des vaisseaux sanguins sur l'image

3° Réglage de la glissière « taille de l'élément structurant pour l'ouverture morphologique » : modifie le degré de suppression des artéfacts de détection de l'image

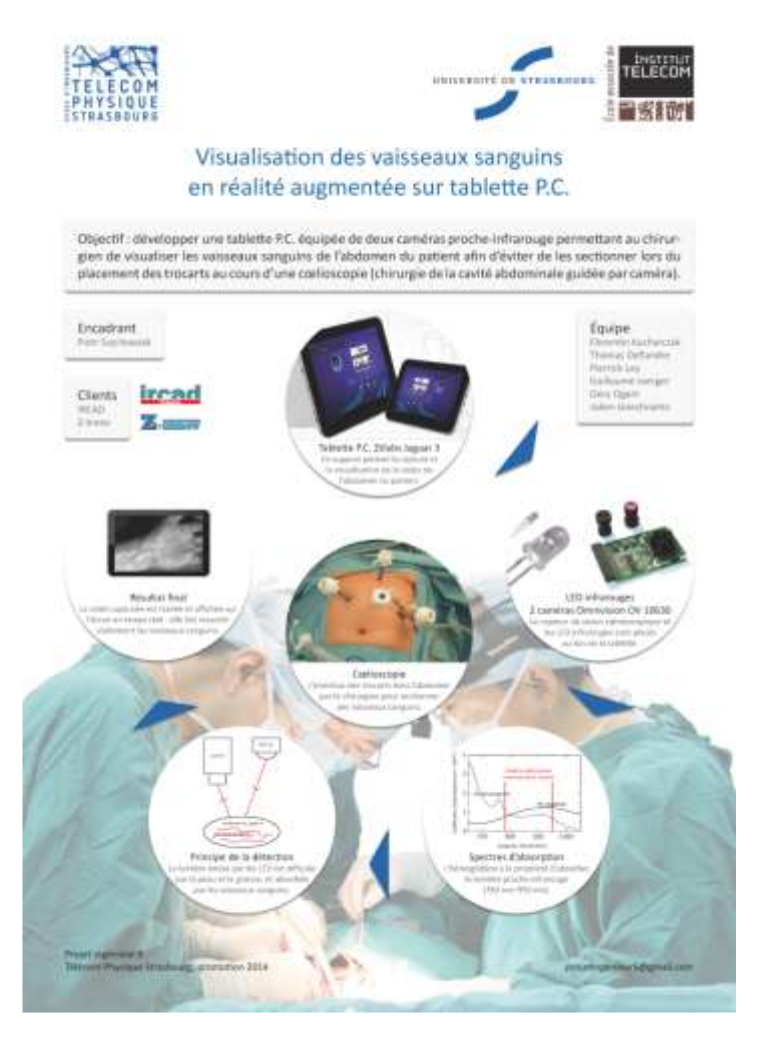
IV. Marketing

Au cours de notre projet, nous avons été amenés à imaginer la commercialisation éventuelle de notre produit. En effet, le but à moyen terme pour nos clients est de breveter notre prototype, ou un prototype similaire amélioré après un approfondissement de notre étude technique. C'est pour cette raison que nous avons réalisé toute une étude juridique qui nous a permis de savoir qu'aucun brevet n'était déposé pour une application similaire à la nôtre.

Dans cette optique, nous avons donc réalisé une affiche et un prospectus. Ces outils, en plus de servir éventuellement dans un but de marketing, pourront également servir à présenter notre projet de manière pédagogique.

1. Poster

Notre affiche, au format A0, permet de présenter rapidement les principales étapes et les principales conclusions de notre travail.



Pour la création du poster, nous avons choisi un design circulaire composé de 5 disques entourant un disque central pour focaliser l'attention sur ce dernier, dans lequel nous avons mis une image de cœlioscopie, qui est le thème notre projet.

Les 6 disques permettent de résumer les différentes étapes de notre projet, avec un cheminement logique orienté par les flèches bleues.

Enfin, bleu et blanc comme couleurs principales a pour but d'évoquer la stérilité et l'hygiène caractéristiques de l'univers hospitalier et du bloc opératoire, ainsi que la froideur et la précision des instruments chirurgicaux.

2. Prospectus

Notre prospectus, qui est en cours de réalisation a pour but de retracer rapidement notre projet et de décrire les fonctionnalités du produit. Il contient également toutes les informations nécessaires pour nous contacter ou contacter les clients.

Notre prospectus a l'avantage d'être portable et de pouvoir être facilement distribué (lors de réunions, conférences,…).

Chapitre 5 : Management de projet

I. Gestion financière

Dépenses	TOTAL
Ingénieurs	48 000
Clients/Encadrant (80h)	4 800
Matériels	7 740
Charges sociales	23 760
Charges de structures	600
Dotations aux amortissements	780,56
Frais divers	200
Frais de déplacement	60
TOTAL	**85 940,56**

Figure 14 : budget prévisionnel

Dépenses	TOTAL
Ingénieurs	42 240
Clients/Encadrant	5 160
Matériels	7 585
Charges sociales	21 330
Charges de structures	600
Dotations aux amortissements	786,56
Frais divers	200
Frais de déplacement	60
TOTAL	**77 961,56**

Figure 15 : état du budget actuel

Travailler en mode projet a nécessité l'estimation d'un budget et le suivi de nos dépenses en fonction de celui-ci.

Pour ce faire, chaque élève envoie tous les dimanches de chaque semaine son relevé horaire au responsable financier qui se charge de les rentrer dans un tableau récapitulatif. Ce tableau nous permet de suivre le temps passé par chacun sur le projet et donc l'évolution de son salaire fictif. Ensuite, se rajoute le salaire des clients et encadrant, tout ceci forme le budget salarial du projet.

En plus de ce budget, nous avons aussi un budget réel qui inclut les dépenses en matériel et frais divers. Le matériel essentiel à la réalisation du projet a été fourni ou financé par les deux clients.

Ce suivi régulier des budgets nous permet de comparer avec le budget estimé (voir Figure 14) en début de projet. Les résultats de cette comparaison apparaissent dans la Figure 16. Du fait de plusieurs changements de stratégie et d'approche dans notre projet et aussi en fonction du matériel disponible les écarts entre les matériels prévus et ceux réellement utilisés sont un assez grands. Nous avons pu nous permettre ces écarts car au niveau du montant ils ne sont pas si importants et sont largement équilibrés par la marge faite sur les salaires. En effet les montants des matériels que nous n'avions pas prévu s'équilibrent presque avec ceux dont nous n'avions pas eu besoin.

Enfin, l’écart au niveau de la charge horaire n’est pas dû à un manque de travail mais à un arrêt dans l’avancement du projet pendant 2 mois dû à un manque d’informations essentielles d’un de nos deux clients.

	Actuel	Prévision	Ecart
Salaires	47 400 €	52 800 €	+ 5 400 €
Matériels	7 740 €	7 585 €	- 155 €
TOTAL	**77 961,56 €**	**85 940,56 €**	**+ 7 979 €**

Figure 16 : différence entre le budget prévisionnel et l’actuel

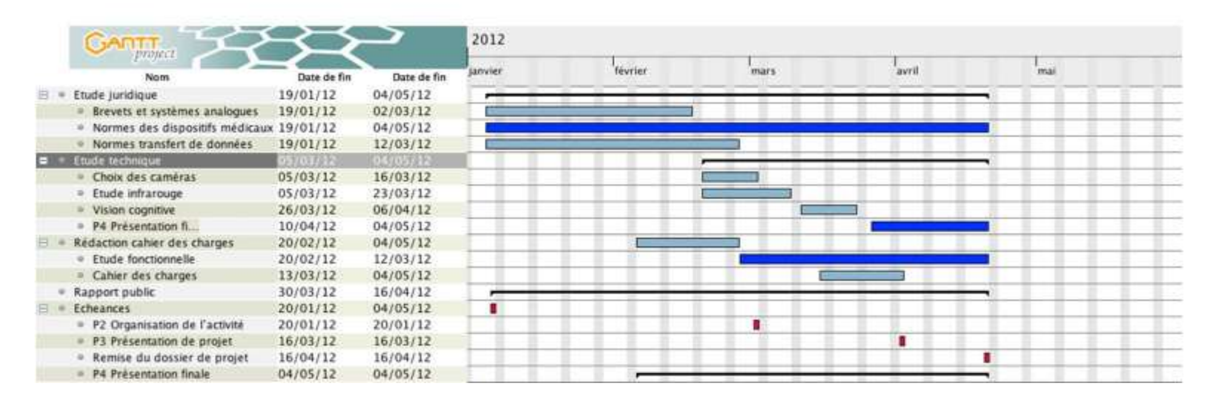
Pour un rapport détaillé des finances, se référer à l’**Annexe 5**.

II. Planning

Une des clés pour la bonne réussite d’un projet, c’est l’élaboration et le suivi d’un planning. En effet, il est très important de lister les tâches principales à réaliser, de manière exhaustive, et de les décomposer en sous-tâches, afin de pouvoir appréhender de la façon la plus précise le travail à réaliser. À partir de cela, il faut évaluer le temps que l’on se donne pour effectuer chaque tâche, et nommer un responsable pour chaque grande partie. C’est cette personne qui s’assurera alors que le travail est réalisé dans les temps, et que chaque tâche avance bien selon ce que l’équipe avait prévu dans le planning.

Le planning sous forme de Diagramme Gantt de la période Janvier – Mai 2012 est le suivant. Il relate l’organisation et la décomposition assez générale de nos différentes études préliminaires.

Diagramme de Gantt



A partir du mois de septembre 2012, nous avons mis en place une nouvelle politique de planification en décomposant de manière beaucoup plus précise, en sous-tâches, avec un responsable et un prévisionnel du temps à passer sur chaque. Il était également intéressent, lorsque chaque tâche était terminée, de calculer le temps effectif passé pour calculer nos écarts, et améliorer nos prévisions.

Cette grille des taches étant trop grande pour être présentée ici, en voici un extrait pour vous montrer son fonctionnement. La couleur rouge représente le travail achevé, le bleu le travail en attente, et le vert le travail en cours.

Domaine d'étude	Tâche principale	Subdivision	Responsable	Date de début	Date de fin prévue	Durée prévue	Ecart
3 - Tablette	3.1 - Réunion déterminante Z-INNOV	3.1.1 - Acquisition matériel commandé	F.K.	09-mars	09-mars	1 heure	0
		3.1.2 - Comprendre fonctionnement de l'environnement	F.K.	09-mars	13-mars	3 heures	1
		3.2.3 - Interfaçage avec notre matériel et test des algorithmes en temps réel	F.K.	11-mars	11-mars	15 heures	En cours
	3.2 - Prototypage finale	3.2.1 - Finalisation du prototype	F.K.	20-mars	15-avr	8 heures	En attente
4 - Préparation R6	4.1 - Préparation des rapports	4.1.1 - Rapport public	T.D.	05-mars	20-avr	12 heures	En cours
		4.1.2 - Rapport financier	J.G.	05-mars	20-mars	6 heures	-1
		4.1.3 - Rapport technique et mode d'emploi	P.L.	05-mars	20-avr	10 heures	En cours
		4.1.4 - Poster et dépliant	J.G.	10-avr	15-avr	4 heures	En attente

III. Plan qualité

1. Gestion des risques

Bien que l'optimisation opérationnelle et décisionnelle soit au cœur de la gestion du projet, il était important d'évaluer les risques pouvant nous empêcher de le mener à terme. Nous pouvons noter que le recensement des problèmes rencontrés lors de la rédaction des rapports bimensuels s'inscrit tout à fait dans cette évaluation dans la mesure où les difficultés rencontrées de manière récurrente devaient aboutir à un changement de notre part dans la gestion ; c'était un moyen de déceler les problèmes et de les corriger au plus vite.



Ces risques sont indépendants du savoir-faire de l'équipe et peuvent désigner entres autres :

- les risques liés à la logistique tels qu'un retard d'acquisition ou la non-réception d'un matériel de la part de Sven Luther, ce dernier étant notre fournisseur privilégié. Ces risques sont faibles mais existants, Sven pouvant avoir un contretemps avec sa société.

- les risques liés à un refus de financement de la société Z-Innov. Ces risques sont faibles compte-tenu des décisions prises par Sven Luther concernant notre matériel mais peuvent exister au vu de la conjoncture économique actuelle.

- les risques liés à une mauvaise prévision dans le planning, ceci peut entraîner des retards pouvant s'accumuler. Ces risques sont minimisés par l'organisation de l'équipe supervisée par les encadrants mais ils sont tout de même existants.

- les risques liés à un incident au sein de l'équipe devant mener à l'arrêt du projet par l'équipe de pilotage. Ces risques sont quasi-inexistants, l'équipe s'étant avant tout construite par affinités. Un redoublement ou une exclusion de plus d'un membre seraient par exemple une cause de cet arrêt.

- les risques liés à la publication d'un brevet dans le courant de l'année 2012-2013. Ces risques sont quasi inexistants et ne compromettraient que partiellement l'avancement de notre projet, cela nous empêcherait seulement de pouvoir commercialiser le livrable.

Une série d'études de faisabilité a été menée afin de prévenir les risques d'abandon. C'est pour cela par exemple que nous avons étudié les brevets déposés en Europe et aux Etats-Unis. L'évaluation devait ensuite mener à réfléchir à un plan de secours en cas d'échec à chaque étape: c'est la gestion du risque.

De plus, notre projet se devait d'être découpé en modules. Lors d'une réunion de validation, nous devions faire le point sur le module achevé et prendre une décision quant à l'évolution du projet : soit nous continuions soit nous en restions là. Le livrable lui-même est modulaire dans sa conception c'est-à-dire que nous avions une base minimum que nous devions être capable de produire pour l'échéance finale. Si le temps nous le permettait, au vu des réunions de validation, nous pouvions étoffer cette base et améliorer le produit.

Ceci étant dit, deux éléments ont compromis l'avancement du projet, l'un d'ordre humain et l'autre d'ordre technique. Le premier a été résolu rapidement en mettant chaque membre devant ses responsabilités et en communiquant avec l'équipe d'encadrement. Le deuxième concerne l'effacement de notre client Sven Luther lors du travail de prototypage pour des raisons professionnelles. Ceci a été un frein dans le sens où le matériel n'a pas été livré à temps en plus d'un manque d'informations pendant plusieurs mois. Ceci nous a mené à contourner le problème en étudiant un achat de matériel en parallèle, à réajuster le planning et à étudier un éventuel prototype alternatif. Finalement, Sven nous a transmis le matériel à temps pour pouvoir le présenter lors de la présentation finale et nous avons conclu à un mode d'échange optimal à sa situation.

2. Plan qualité

Afin de vérifier le bon déroulement du projet, et de s'assurer que le travail réalisé répondait convenablement aux désirs des clients, il était impératif de mettre en place des outils qui mesuraient l'état du projet au cours de son avancement. Ces outils avaient pour but d'indiquer si le projet respectait correctement la ligne de conduite imposée par les clients concernant l'aspect méthodique, temporel et de communication.

En outre, la principale fonction du plan qualité concernait le suivi du cahier des charges. Il s'agissait d'une part, de trouver un accord avec les clients quant à la rédaction de celui-ci. D'autre part, le plan qualité s'assurait, lors de la réalisation du produit, que celui-ci y était conforme. Nous avons convenu d'un cahier des charges signé par les clients lors de la présentation P4 en avril 2012. Cependant, il a largement été modifié comme décrit dans la partie *Evolution du cahier des charges*. Il n'y a pas eu de litige car les modifications ont été validées par les deux parties.

De plus, il faut également souligner l'importance de la communication avec les clients au cours du projet. Il s'agissait de les tenir informés de l'état d'avancement de notre travail tout en s'assurant que le mode d'information leur convenait (rapports, synthèses des travaux) mais aussi de savoir les solliciter à bon escient. C'est pourquoi un questionnaire qualité leur a été envoyé à propos de nos méthodes de travail, de notre comportement et de notre communication (joint en **Annexe 5**). Au vu des retours, les deux clients semblaient être satisfaits de notre prestation.



Synthèse :

Thèmes	Moyens	Décision
Communication interne	Groupes Facebook	✓
Réunions	3 fois par mois	✓
Rapports de réunions	Un membre à chaque réunion. Diffusion du rapport.	✓
Communication externe	Boîte mail projetingenieur	✓
Suivi du planning	Distribution des tâches, mise à jour fréquente	✓
Innovation	Recherches, brainstorming	✓

Conclusion

Ces dix-huit mois ont été avant tout l'occasion de nous plonger dans un milieu qui nous intéressait et que nous connaissions peu. L'environnement médical avec les visites périodiques à l'IRCAD et les diverses visites au bloc opératoire ont été une immense source de motivation et d'émulation.

De plus, nous en connaissons désormais un peu plus sur le fonctionnement d'un projet, que ce soit sur le plan de la communication, de la gestion d'un emploi du temps ou de la gestion de l'équipe. Pour mener à bien la conception de notre livrable, il nous a fallu implémenter divers outils dont certains sont de notre propre initiative.

Dans un premier temps, nous avons étudié la faisabilité du projet qui s'est avérée positive. Ceci nous a permis de valider le concept techniquement par une série d'expériences en laboratoire et au bloc opératoire. Une fois les clichés obtenus, nous avons étudié un moyen de les améliorer et les rendre exploitables par un chirurgien. Ainsi, nous avons écrit un logiciel de traitement d'images afin d'y ajouter l'aspect réalité augmentée du sujet. Enfin, tous les éléments étaient réunis pour concentrer notre travail sur un prototype.

Comme dit dans le corps du rapport, nous devions à l'origine exploiter la stéréoscopie pour restituer une image en trois dimensions sur la tablette à l'aide de deux caméras. Il n'a pas été possible de pousser l'étude à son terme, la priorité étant de prouver techniquement la faisabilité du concept.

De plus, nous avions des idées d'amélioration du prototype que le temps ne nous a pas permis de développer. Hormis l'intégration mécanique du prototype dans un boitier convivial et ergonomique, notre but était de livrer un prototype avec un logiciel permettant d'effectuer un réglage automatique et adaptatif des paramètres en fonction de la texture de la peau, de l'intensité des LED, et de la visualisation « prétraitement » des veines. En effet, le chirurgien a la possibilité de régler trois paramètres à l'aide d'une glissière interactive mais ceci repose sur le fait qu'il connaît ces paramètres, ce qui n'est pas obligatoirement le cas. Ceci dit, notre livrable reste un prototype qui est par définition évolutif. Nos idées pourront être implémentables dans le futur.

Pour finir, il nous a été livré un projet difficile et grâce à la supervision de nos clients et de notre encadrant, nous avons pu le mener à bien en remplissant l'objectif de prouver la faisabilité technique du concept. Nous en tirons tous une grande satisfaction.

Table des figures

I. Bibliographie

I. Prise en main du sujet et de son domaine d'application

- **Infrared Imaging System for Analysis of Blood Vessel Structure**
  R. Fuksis, M. Greitans, O. Nikisins, M. Pudzs

  Institute of Electronics and Computer Science

- **Development and clinical trial of a practical vessel imaging system for vessel punctures in children**
  Natascha J. Cuper, Rudolf M. Verdaasdonk, Rowland de Roode and Erica Septer

  Dept. of Medical Technology & Clinical Physics and Clinical & Haematological Laboratory University Medical Center Utrecht

- **The Clinical Evaluation of Vein Contrast Enhancement**
  H. D. Zeman, G. Lovhoiden, and C. Vrancken

- **Vein pattern recognition. Image enhancement and feature extraction algorithms**
  Septimiu Crisan, Ioan Gavril Tarnovan, Titus Eduard Crisan

  Department of Electrical Measurement, Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Cluj-Napoca

II. Etude des brevets et systèmes analogues

Sites internet :

- www.google.com/patents
- www.epo.org
- www.brainlab.com
- http://www.osirix-viewer.com/
- http://global.smith-nephew.com
- http://www.apple.com/science/profiles/maki/

Différents brevets :

- **Three-dimensional infrared imager for subcutaneous puncture and study of vascular network**
- Patent No.: US 6 178 340 B1
- Date of Patent: Jan. 23, 2001
- Inventor: Eduardo Svetliza (IL)

- **Infrared aided method and apparatus for venous examination**
- Patent No.: US 5 519 208
- Date of Patent: May 21, 1996
- Inventor: Joel Esparza

- **Infrared aided method and apparatus for venous examination (this application is a continuation-in-part of application US 5 519 208)**
- Patent No.: US 5 608 210
- Date of Patent: Mar. 4, 1997
- Inventor: Joel Esparza

- **Apparatus for enhanced visual venous examination**
- Patent No.: US 5 947 906
- Date of Patent: Sep. 7, 1999
- Inventor: Frederic O. Dawson, Jr.

- **Micro vein enhancer (AccuVein LLC)**
- Patent No.: US 7 904 138 B2
- Date of Patent: Mar. 8, 2011
- Inventor: Ron Goldman

- **Vein locating device for vascular access procedures**
- Patent No.: US 2008/0147147 A1
- Date of Patent: JUN. 19, 2008
- Inventor: David M. Griffiths

III. Etude de l'infrarouge

Sites internet :

- http://omlc.ogi.edu/spectra/hemoglobin/
- http://membres.multimania.fr/nirspectroscopy/

Thèse :

- **Extraction de la signature veineuse dans le Moyen et le Proche Infrarouge**
  Nadia BOUZIDA, 2009
  Université de Quebec, Canada

IV. Choix de la caméra la plus adaptée

Sites internet :

- www.ovt.com

Documentation technique :

- Documentation des différentes caméras à disposition de *Z-Innov*

V. Calibrage de la caméra

Sites internet :

- www.digitalspirit.org/file/index.php/obj-download/docs/CM-TransmissionData.pdf
- optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C06/co/OPI_fr_M05_C06_web.html

VI. Normes de transfert de données

Sites internet :

- www.wikipedia.org
- www.journaldunet.com
- www.socketmobile.com

VII. Règlementations sur les dispositifs médicaux

Site internet :

- www.afssaps.fr

VIII. Traitement d'images

Sites internet :

- http://www.willowgarage.com/pages/software/opencv
- http://opencv.willowgarage.com/wiki/
- http://opencv.org/

- http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/files/opencv-win/
- http://spirit-science.fr/doc_rayons/couleurs.html
- http://webdav-noauth.unit-c.fr/files/perso/ythomas/cours/Videocommunications1%20/lut/Rchap2_TransfoHisto_FR.pdf.

Documentation technique (cours) :

- *Learning OpenCV*, Gary Bradski & Adrian Kaehler, O'Reilly, 2008
- Cours de morphologie mathématique de Vincent Agnus, Ircad
- Détection de contours, *Traitement d'images,* Alain Boucher, IFI
- Segmentation d'images médicales, Hervé Delingette, Inria







Strasbourg, Mai 2012

Réalisation d'une tablette PC équipée de 2 caméras proche infrarouge pour visualiser en réalité augmentée des vaisseaux sanguins sous-cutanées et un modèle préopératoire d'un patient

ANNEXE 1 : CAHIER DES CHARGES

Direction de *IRCAD & Z-INNOV*

Rédacteur : *Equipe de projet #6 Télécom Physique Strasbourg*





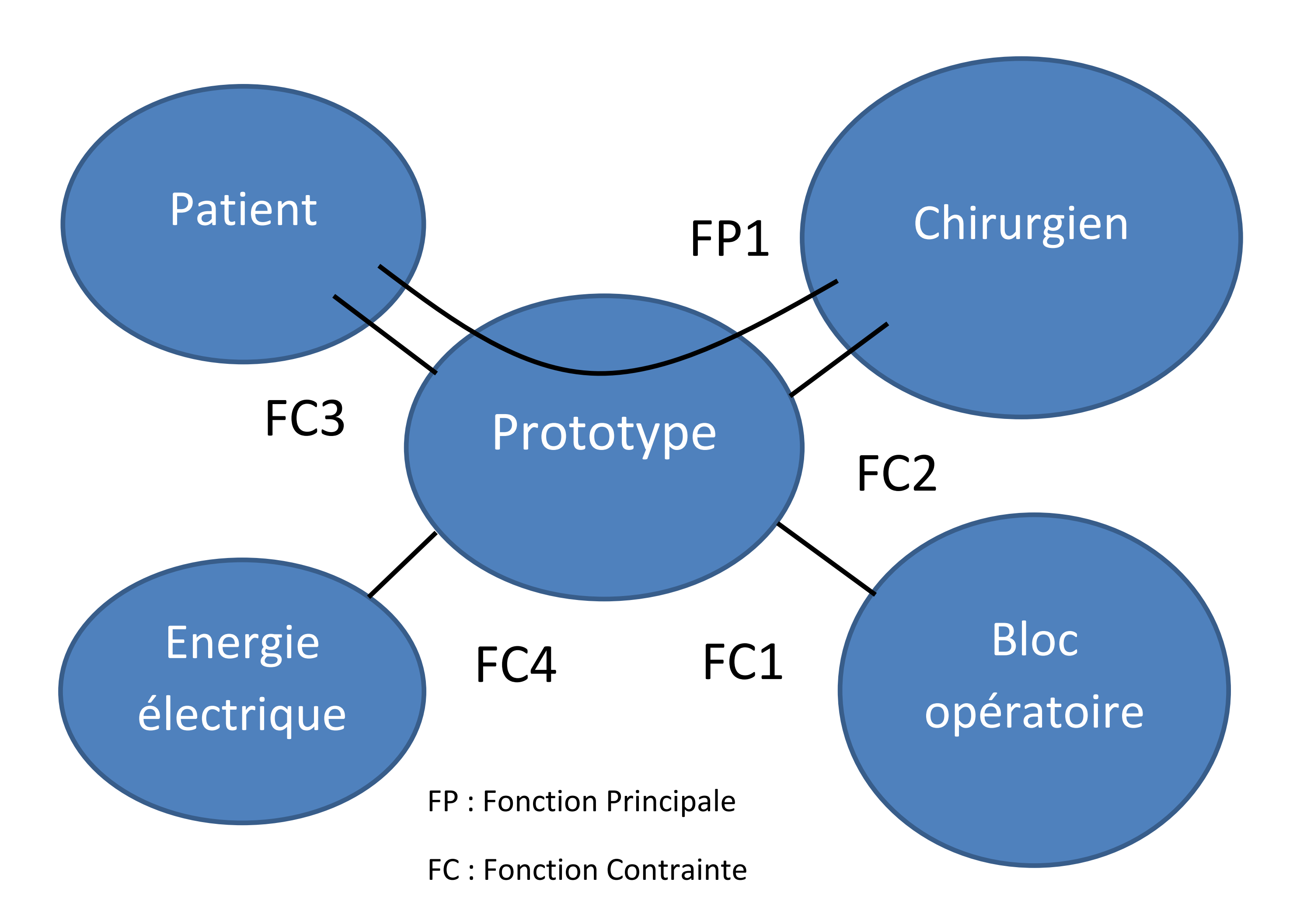
Tables des matières

I Présentation du projet

1) Contexte et expression du besoin

L'IRCAD (Institution de Recherches contre les Cancers de l'Appareil Digestifs) et Z-INNOV, entreprise spécialisée en électronique et systèmes embarqués souhaitent développer une plaquette PC équipée de deux caméras proche infrarouge pour visualiser les vaisseaux sanguins sous-cutanées du torse d'un patient dans le but de faciliter la tâche du chirurgien qui effectue de la chirurgie laparoscopique sur ce patient. Ce projet est confié à une équipe de 6 élèves ingénieurs qui ont, désormais, un an pour réaliser le prototype.

2) Caractérisation du besoin



Voici ci-dessous les 5 fonctions de services que doit respecter le prototype :

Repère	Fonction de services	Fonctions techniques	Solutions techniques	Critère	valeur
FP1	Visualiser les vaisseaux sanguins du torse du patient en réalité augmentée	Eclairer la zone du corps	LED	longueur d'onde	780-950 nm
				Puissance	*à étudier*
		Capturer les rayonnements IR réfléchis	Caméra IR OV10630	Résolution	VGA minimum
		Transmettre la vidéo au système de traitement	carte électronique	Vitesse de transmission	100 Hz minimum
		Traiter la vidéo	processeur + programmation en open CV	Vitesse de traitement	60 Hz minimum
		Afficher la vidéo	Tablette	Résolution	1280 x 720
				Luminosité	300 cd
				Taille écran	1280 x 720
FC1	Respecter les normes			Normes juridiques	
FC2	Etre manipulable par le praticien			Poids	2 kg maximum
				Taille	30 cm x 20 cm
				Bande verticale sur le coté	30 mm de largeur
FC3	Etre sans danger pour le patient			Rayonnement	*à étudier*
				Stérilité	normes
FC4	Etre alimenté en énergie électrique		Alimentation filaire	Puissance de l'alimentation	

3) Objectifs

Le prototype à réaliser doit afficher en temps réel l'image du corps du patient faisant apparaître nettement ses vaisseaux sanguins sous-cutanés afin que le chirurgien puisse éviter de sectionner une veine ou un vaisseau sanguin au cours de l'opération. Le principe repose sur la réflexion de rayonnement infrarouge par le corps émis par des diodes électroluminescentes infrarouge qui sont ensuite capturés par les caméras.

En résumé, les principales caractéristiques de la réalisation sont :

- Une plaquette PC qui affiche l'image du corps du patient avec les vaisseaux sanguins qui apparaissent, équipée d'une carte électronique assurant l'acquisition, la transmission et le traitement des données.

- Deux caméras proche infrarouge permettant de capturer l'image.

- Un ensemble de diodes électroluminescentes infrarouges émettant le rayonnement sur la partie du corps à visualiser.

4) Moyens

Z-INNOV met à disposition plaquette avec sa carte électronique équipée du matériel permettant de transmettre la vidéo, d'un processeur de traitement de données, accompagné des algorithmes de traitement actuellement exploités sur la technologie présente sur les cartes de Z-INNOV, mais aussi une caméra proche infrarouge avec son logiciel permettant de visualiser l'image sur ordinateur. L'IRCAD, quant à lui, met à disposition un ensemble de diodes électroluminescentes soudées sur un support et formant une unité.

II Description du prototype

1) Aspect pratique

La tablette PC devra posséder un espace horizontale de largeur 3 cm afin que le praticien puisse mettre son pouce lorsqu'il tient la tablette sans toucher l'écran.

2) Aspect électronique et logiciel

La plaquette PC contiendra la carte électronique sur laquelle figura un système d'acquisition et de transmission des vidéos provenant des deux caméras ainsi que d'un processeur ZMS 20 qui traite les données. Cette unité de calcul sera programmée en Open CV, et le traitement s'effectuera sous Androïd. De plus, tout ce qui concerne l'aspect fabrication électronique devra respecter la norme IEC 60601.

3) Aspect imagerie

L'image de la partie du corps de patient devra s'afficher en temps réel sur l'écran de la plaquette PC en faisant apparaître nettement les vaisseaux sanguins sous-cutanés.

4) Aspect optique

Les caméras utilisées doivent être sensibles aux longueurs d'ondes proches infrarouges : 750 – 950 nm. Pour réaliser le prototype, il sera utilisé des caméras **OV10630,** fournies par Z-INNOV.

5) Aspect juridique

Le prototype est un dispositif non considéré comme un moyen de diagnostic, mais utilisé comme aide pour le chirurgien. C'est un dispositif médical non implantable dans le corps humain, servant seulement à l'étude de l'anatomie du patient. Il doit donc pouvoir être introduit dans un bloc opératoire. C'est pourquoi il devra supporter la stérilisation, mais aussi respecter les normes du bloc opératoire. Il respectera aussi les règles fixées par l'AFSSAPS (Agence Française de Sécurité Sanitaire des Produits de Santé), qui s'assure que le produit respecte toutes les contraintes vis-à-vis de la santé et de la sécurité.

III Précisions sur les prestations

- La puissance des LED est à étudier et à choisir de manière à obtenir les résultats attendus.
- Le rayonnement IR est aussi à étudier afin de le choisir de manière à ce qu'il ne brûle pas le patient durant une exposition de dix minutes.

Date et signatures

IRCAD & Z-INNOV

Annexe 2 : Vision cognitive & calibrage de caméras

Compréhension d'un phénomène à partir d'information visuelle (ex. : reconnaissance de formes, localisation, contrôle dimensionnel d'objets, reconstruction de l'environnement).

- 1re étape : calibrage géométrique du capteur visuel ;
- 2de étape : traitement de l'information visuelle.

Calibrage géométrique du capteur visuel

Consiste à choisir un modèle géométrique du capteur visuel et à en déterminer les paramètres, en vue de corriger les défauts du capteur ou de retrouver les coordonnées des points de la scène tridimensionnelle observée à partir des coordonnées des points de l'image bidimensionnelle prise par le capteur.

On choisit ici de modéliser le capteur visuel avec le *modèle du sténopé*. Il est constitué d'un *plan–image* dans lequel se forme l'image par projection perspective des points de la scène. Un point de l'espace est transformé en un *point–image* du plan–image via trois transformations élémentaires successives entre les quatre repères suivants :

- le repère de la scène (repère tridimensionnel arbitraire),
- le repère de la caméra (repère tridimensionnel d'origine le centre optique de l'objectif du capteur et d'axe des côtes perpendiculaire au plan–image),
- le repère du détecteur (repère bidimensionnel d'origine le *centre de l'image*, projeté orthogonal du centre optique dans le plan–image, et d'axes dans le plan–image),
- le repère de l'image (repère bidimensionnel d'origine un coin du plan–image).

Ce modèle *linéaire* est valable uniquement lorsque la lentille du système optique de la caméra respecte les *conditions de Gauss*, autrement il apparaît des distorsions.

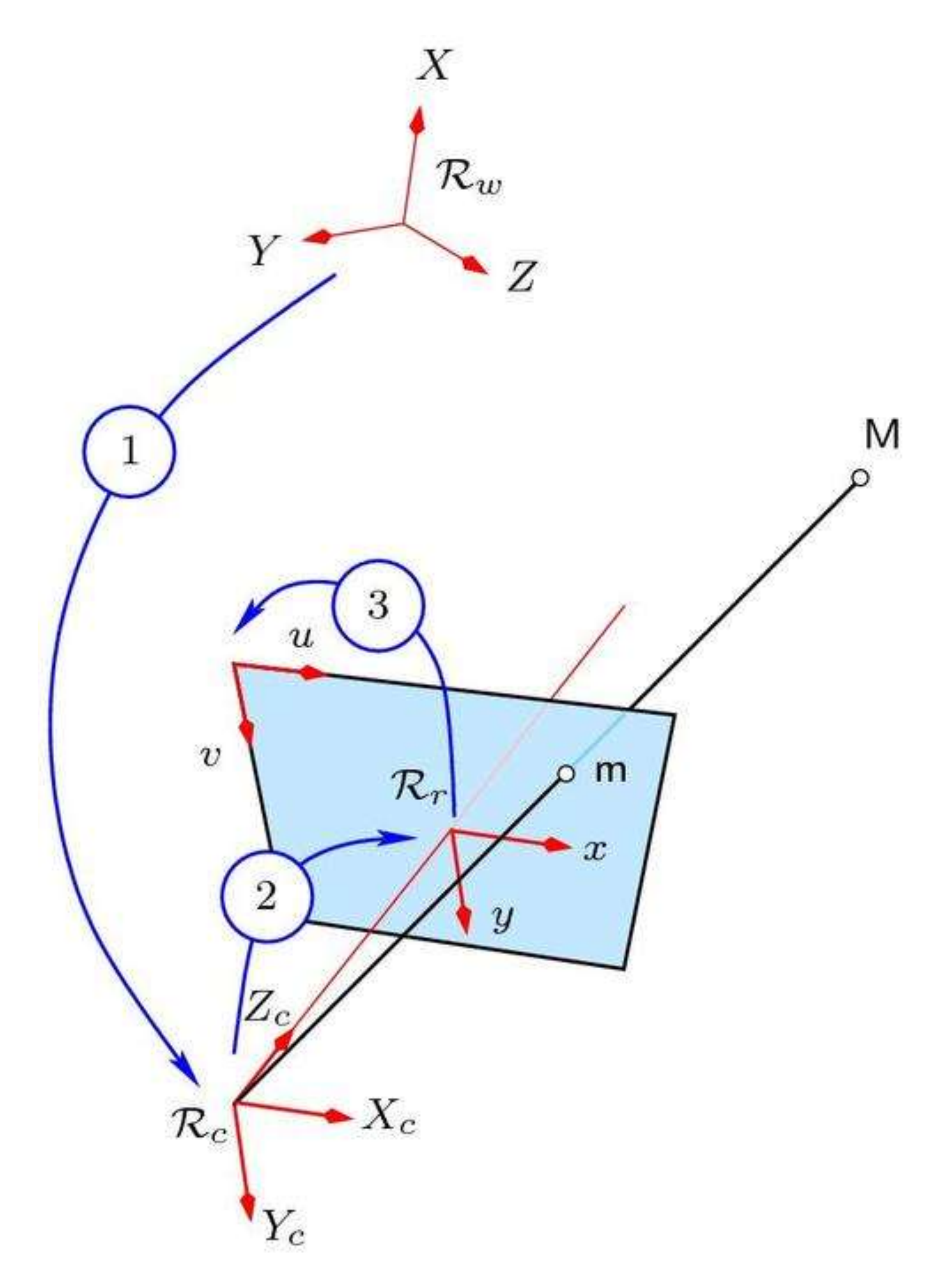


Figure 1—Transformations élémentaires du modèle du sténopé et repères associés

$$(X, Y, Z) \overset{T}{\rightarrow} (X_c, Y_c, Z_c) \overset{P}{\rightarrow} (x, y) \overset{A}{\rightarrow} (u, v)$$

On utilise les *coordonnées homogènes* (car elles permettent d'obtenir des relations linéaires avec ce modèle) :

$$M = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, M_c = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}, m = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, m_i = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}.$$

- **Transformation 1** :

$$T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Elle correspond à une rotation et une translation.
On appelle *paramètres extrinsèques* de la caméra les paramètres de T. Ils sont au nombre de 6 (car 3 paramètres suffisent pour la rotation) :

$$(r_\alpha, r_\beta, r_\gamma, t_x, t_y, t_z).$$

- **Transformation 2** :

$$T = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Elle correspond à une projection.
f (en mètres) est la distance focale de l'objectif de la caméra.

- **Transformation 3** :

$$A = \begin{bmatrix} k_x & k_x \cot\theta & c_x + c_y \cot\theta \\ 0 & k_y / \sin\theta & c_y / \sin\theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Elle correspond à la conversion mètre–pixel.
k_x et k_y (en pixels par mètre) sont les fréquences spatiales suivant x (resp. y), (c_x, c_y) (en pixels) sont les coordonnées du centre de l'image et θ (en radians) est l'angle entre les lignes et les colonnes de l'image (en pratique très proche de $\pi/2$ rad).
On note :

$$K = AP = \begin{bmatrix} f_x & f_x \cot\theta & c_x + c_y \cot\theta & 0 \\ 0 & f_y / \sin\theta & c_y / \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

$f_x = f\ k_x$ et $f_y = f\ k_y$ (en pixels) sont les distances focales de l'objectif de la caméra suivant x (resp. y).
On appelle *paramètres intrinsèques* de la caméra les paramètres de K. Ils sont au nombre de 5 :

$$(f_x, f_y, c_x, c_y, \theta).$$

On a ainsi :

$$m_i = APTM = KTM.$$

En supposant que $\theta = \pi/2$ rad, on obtient :

$$u = f_x \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + t_x}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_z} + c_x,$$

$$v = f_y \frac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + t_y}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_z} + c_y.$$

Les relations obtenues, il reste à trouver les valeurs des paramètres. Ceux qui nous intéressent sont les paramètres intrinsèques (dépendant uniquement de la caméra) puisque les paramètres extrinsèques, eux, varient avec la position et l'orientation de la caméra (des méthodes spécifiques existent pour obtenir en temps réel les paramètres extrinsèques).

Pour trouver les paramètres intrinsèques de la caméra, on utilise une mire de calibrage (plaque composée de taches circulaires) dont on prend une séquence d'images sous différents angles avec la caméra. Pour chaque image, chaque point–image d'une tache circulaire donne deux équations : ses coordonnées (u, v). Si le nombre de taches de la mire et le nombre d'image de la séquence sont assez grands alors il y aura assez d'équations pour le nombre d'inconnues (les paramètres) et l'on peut résoudre le problème.

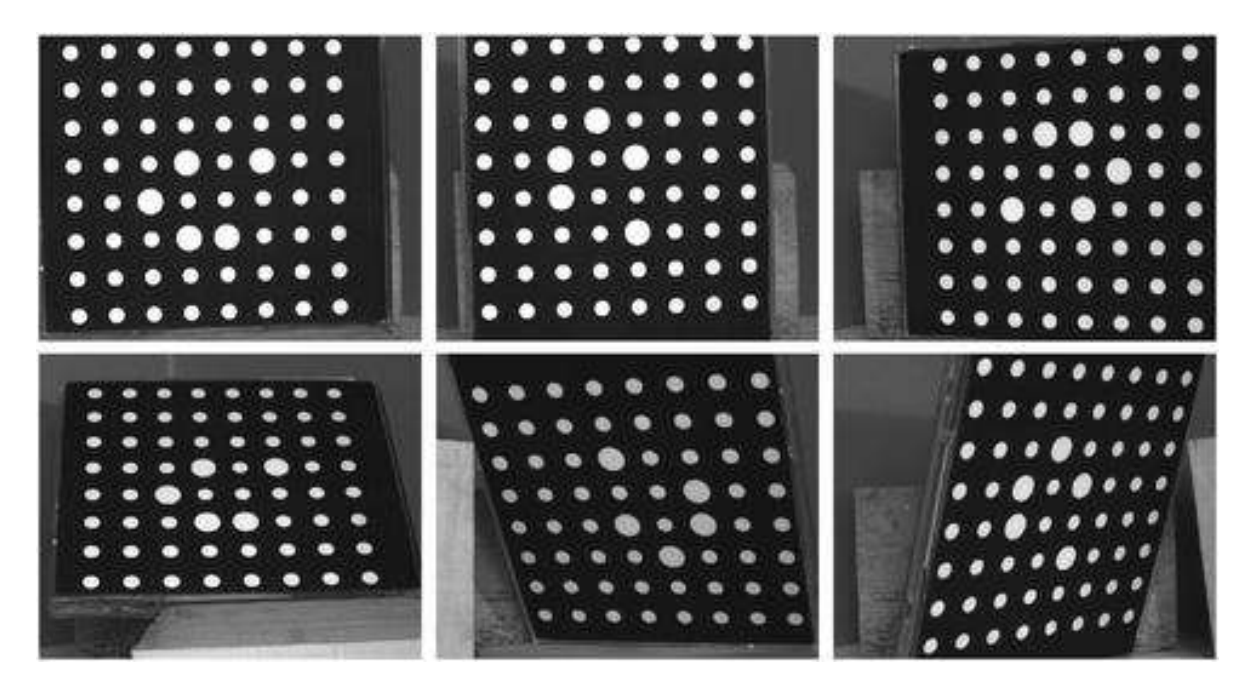


Figure 2—Exemple d'une séquence de 6 images d'une mire de calibrage à 64 taches circulaires

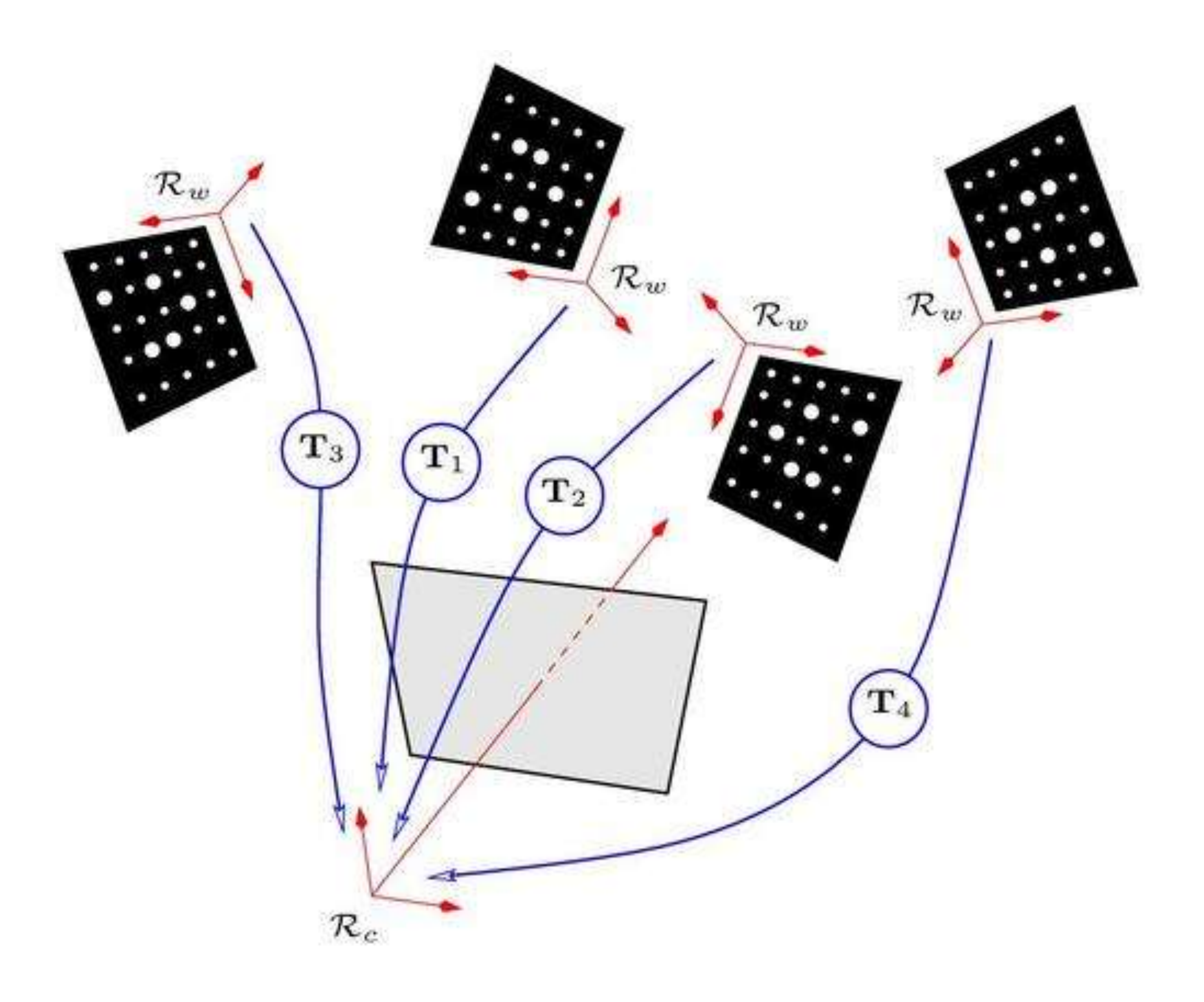


Figure 3—Transformations correspondants à chaque image

Avec une seconde caméra (vision stéréo), on a en plus la possibilité de faire de la *triangulation* (retrouver les positions des points de la scène à partir de leurs point-images).

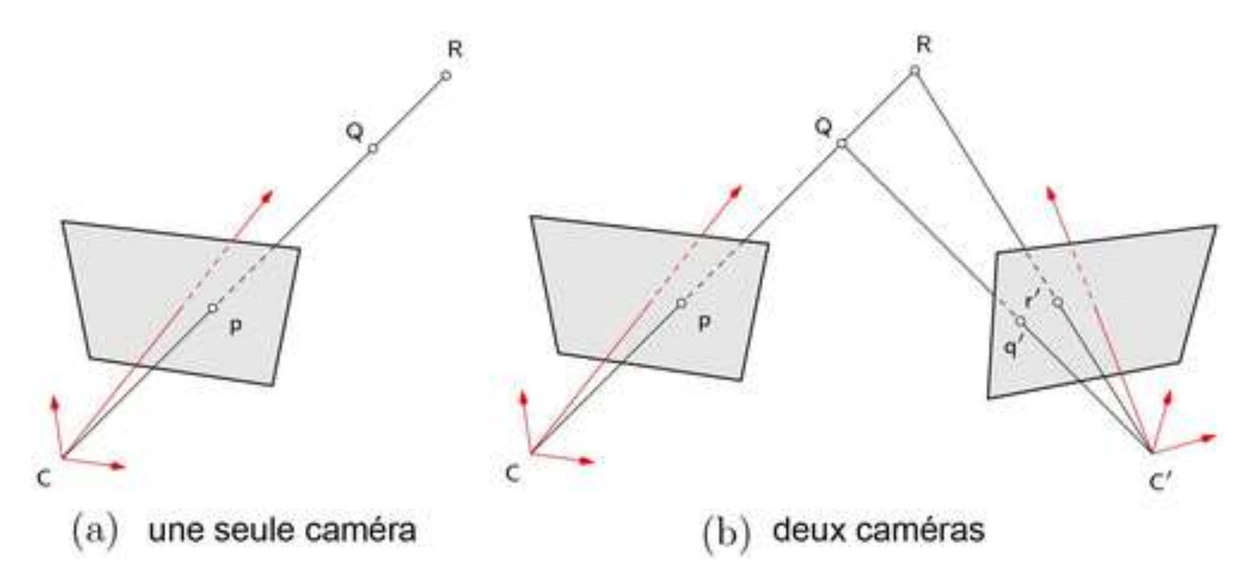


Figure 4—Triangulation

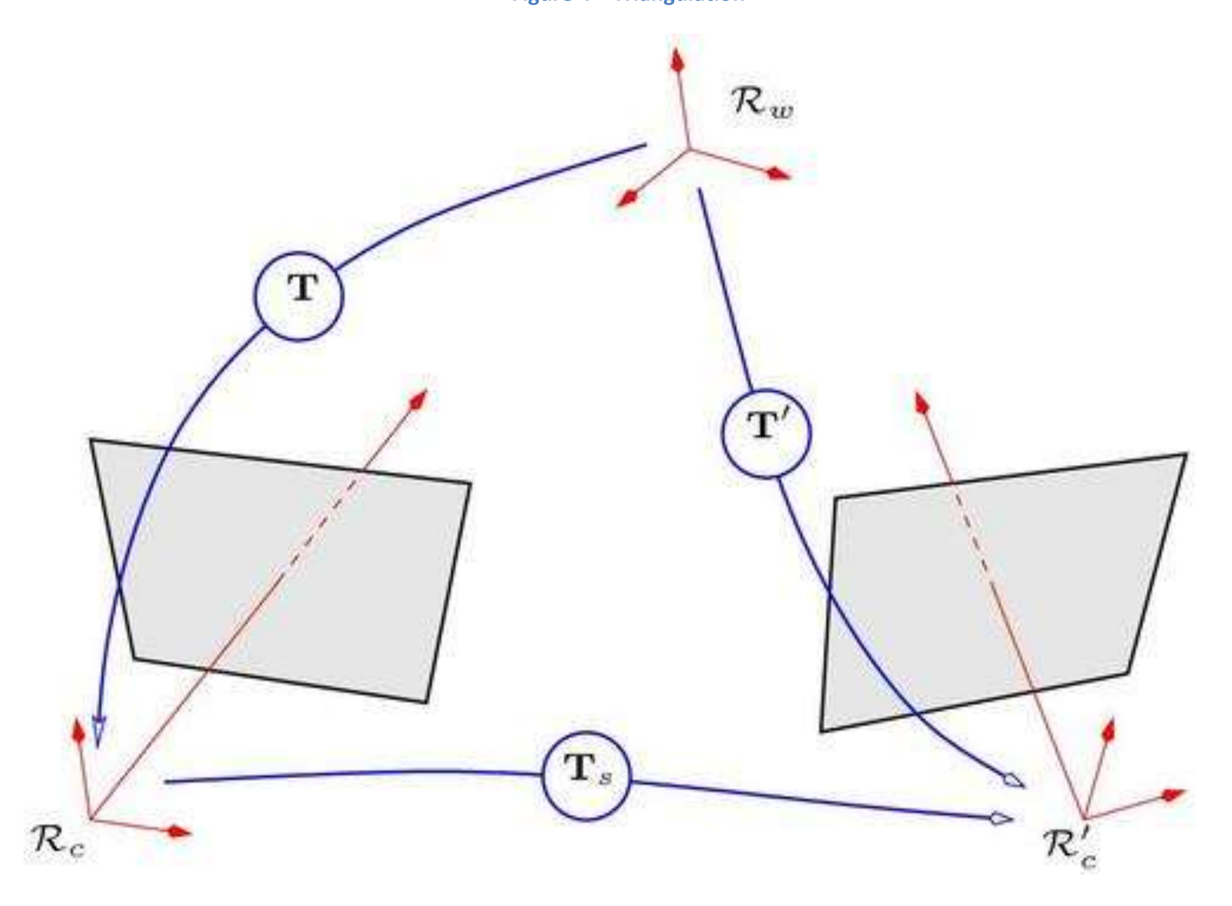


Figure 5—Stéréovision

Pour connaître la transformation T_s inter caméras il suffit de connaître leur transformation extrinsèques T et T' :

$$T_s = T'T^{-1}.$$

On a ainsi :

$$m_i = KTM,$$
$$m_i' = K'T_sT\,M.$$

En supposant encore que $\theta = \pi/2$ rad, on obtient :

$$u = f_x \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + t_x}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_z} + c_x,$$

$$v = f_y \frac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + t_y}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_z} + c_y,$$

$$u' = f'_x \frac{r'_{11}X + r'_{12}Y + r'_{13}Z + t'_x}{r'_{31}X + r'_{32}Y + r'_{33}Z + t'_z} + c'_x,$$

$$v' = f'_y \frac{r'_{21}X + r'_{22}Y + r'_{23}Z + t_y}{r'_{31}X + r'_{32}Y + r'_{33}Z + t'_z} + c'_y.$$

Finalement, en résolvant ce système surdéterminé de quatre équations on retrouve les coordonnées (X, Y, Z) du point M de la scène.

Traitement de l'information visuelle

Les besoins dans le traitement des images fournies par le capteur visuel restent à déterminer précisément par les tests.

Annexe 3 : Protocole des tests

Matériel :

- Spot caméra infrarouge équipée des LEDS émettant à 850 nm

- Une carte USB permettant de relier la sortie vidéo de la caméra à un ordinateur (avec son logiciel permettant d'effectuer des enregistrements).

- Toute la connectique nécessaire à alimenter la caméra ainsi que de relier la caméra à la carte.

1ère ETAPE :

Faire fonctionner la caméra et acquérir la vidéo.

2ème ETAPE :

Vérifier la concordance « longueur d'onde des leds- absorption de la caméra » et donc, de réussir à observer les vaisseaux sanguins de la main en vidéo.

3ème ETAPE :

Faire plusieurs essais en variant les paramètres : luminosité, peau, distance « caméra-peau ».

4ème ETAPE :

Analyser les résultats, tirer les conclusions.

1ère ETAPE :

Fonctionnement de la caméra : **OK**

Acquisition de la vidéo : **OK**

Enregistrements : **OK**

Temps nécessaire pour réaliser cette étape : **2 heures**

2ème ETAPE :

Visualisation des vaisseaux sanguins : OK

Réglage caméra (luminosité, contraste) OK

Temps nécessaire pour réaliser cette étape : 1,5 heure

3ème ETAPE : OBSERVATIONS DES TESTS

PEAU BLANCHE **Luminosité=12 ; contraste = 40**

	Distance 10 cm	Distance 20 cm	Distance 40 cm
Luminosité forte	Contraste : + Précision : +++	Contraste : + Précision : ++	Contraste : ++ Précision : +
Luminosité moyenne	Contraste : + Précision : +++	Contraste : ++ Précision : ++	Contraste : +++ Précision : +
Luminosité faible	Contraste : + Précision : +++	Contraste : ++ Précision : ++	Contraste : +++ Précision : +

Temps pour effectuer les tests : **1 heure**

4ème ETAPE :

Conclusion : + luminosité est faible, + le contraste est fort
Distance optimale : environ 15-20 cm
+distance faible, + la précision est meilleure

Annexe 4 : Détection des courbes

Pour aboutir au programme final de notre projet, nous avons également travaillé sur la détection des courbes en développant un second programme. Nous avons écrit ce second programme en *Matlab*. Il effectue sur l'image :
— une binarisation ;
— une fermeture morphologique.

1. Contenu

Dans le répertoire « detection_des_courbes », on trouve:
— le fichier Matlab ;
— le fichier image des veines pris par Pierrick original ;
— le fichier image des veines pris par Pierrick traité par Photoshop (avec un filtre d'accentuation) ;
— le fichier image des veines pris par Pierrick traité par Photoshop, traité par mon programme.

2. Résultats

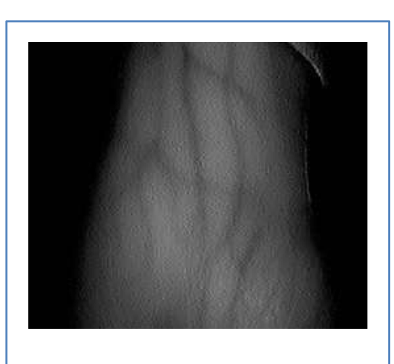
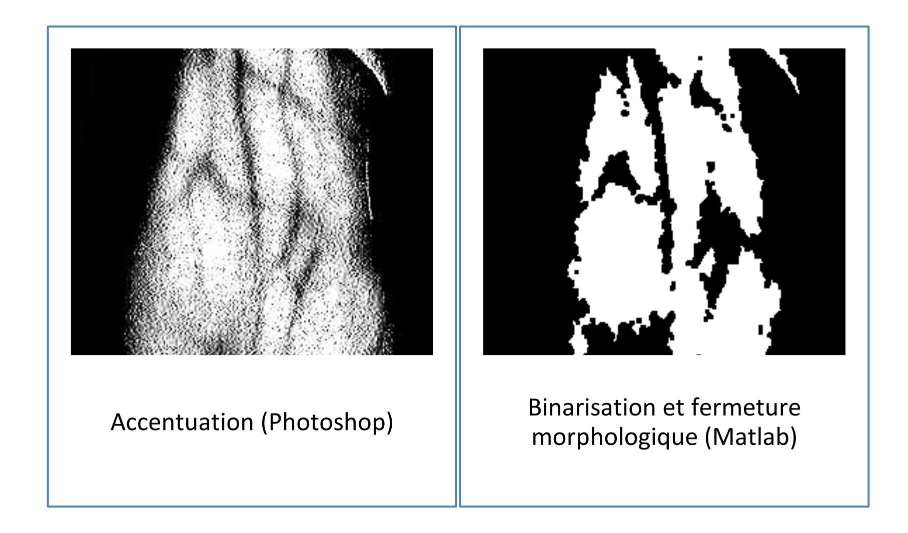


Image des veines originale



Accentuation (Photoshop)

Binarisation et fermeture morphologique (Matlab)

3. Analyse

On constate que la binarisation suivie de la fermeture morphologique par le programme élimine une grande partie de l'information de l'image accentuée.

Annexe 5 : Rapport financier

Le rapport financier permet d'établir avec précision le budget de notre projet, Ainsi, nous pouvons voir quel budget nos clients auraient dû investir pour nous donner la possibilité de développer notre projet. Ce rapport permet donc d'établir la rentabilité ou non de notre projet. Il s'inscrit dans une logique d'analyse, d'interprétation et d'évaluation de la situation financière de notre projet de janvier 2011 à mai 2013. Ainsi il permettra non seulement d'éclairer nos clients au sujet des différents flux financiers ayant eu lieu au cours de cette année et demi, mais aussi servira d'outil d'aide aux décisions quant à la poursuite du projet, son arrêt ou un investissement plus important encore.

Nous avons essayé de présenter ce rapport d'une façon pédagogique, sans rentrer dans les détails techniques.

L'IRCAD (Institut de Recherche contre les Cancers de l'Appareil Digestif) a été fondé en 1994 au sein des Hôpitaux universitaires de Strasbourg. C'est une association régie par la loi de 1908 du code civil local d'Alsace-Moselle. Cette structure juridique permet en particulier à l'IRCAD d'avoir un projet économique et d'être habilité à effectuer des actes habituels de commerce, tout en conservant un objectif non lucratif et en recevant des financements à la fois privés et de collectivités locales, territoriales et européennes via des participations à des projets de recherche.

Z-INNOV est une entreprise strasbourgeoise spécialisée principalement dans le domaine de l'informatique et de l'électronique. Z-INNOV est une SASU (Société par Actions Simplifiée à associé Unique) de capital social de 30.000 euros.

Nous allons donc effectuer tous nos bilans en HT.

Nous avons également établi un budget fictif. En effet, nous n'avons pas été rémunérés au cours du développement de notre projet dans le cadre de notre cursus universitaire, mais nos heures de travail sont comptabilisées en tant qu'heures travaillées par des ingénieurs dans ce budget fictif. Cela nous permet de nous rapprocher encore plus du coût réel total de notre projet.

II. Budget d'investissement

Pour le bon déroulement de ce projet nous avons dû acquérir différents matériels. Nous avons par exemple tous eu besoin de nos ordinateurs plus de ceux des encadrants, de connexions internet mais aussi de caméras et autres matériels. Ces différents investissements sont reportés dans ce tableau :

Matériels	Prix d'achat
8 ordinateurs portables	6400
Internet	400
Tablette	425
Caméra	200
Camera Vision Nocturne	50
Carte d'acquisition vidéo	50
Transformateurs	40
Connectique	20
TOTAL	**7585**

III. Budget de fonctionnement réel

a) Frais de personnel

Les frais de personnel sont issus du temps passé sur le projet de nos 2 clients et de notre encadrant.

Ci-dessous les tarifs horaires bruts pour chaque poste :

- Encadrant : 60€
- Consultant : 60€
-

Le temps passé par nos clients et encadrants a été suivi en temps réel pendant tout le projet, le bilan des frais personnels est dans le tableau ci-dessous :

	Heures	Salaires
Clients	76	4560
Encadrants	10	600
TOTAL	**86**	**5160**

b) Charges sociales

À ces frais de personnels s'ajoutent les charges sociales qui s'élèvent à 45% du salaire brut. Ainsi donc, le détail des salaires brut et net :

	Salaire Brut	Charges sociales	TOTAL
Clients	4560	2052	6612
Encadrants	600	270	870
TOTAL	**5160**	**2322**	**7482**

c) Charges de structures

Les charges de structures comprennent les locaux, le chauffage, l'électricité… Elles sont estimées à 400€ par mois. Nous avons chacun travaillé 200 heures sur le projet et comme nous avons parfois travaillé ensemble, nous n'avons donc pas utilisé les locaux 1,7 mois mais plutôt 1,5 mois. Ainsi donc les charges de structures s'élèvent à :

400 x 1.5 = 600 €

d) Dotations aux amortissements

Nous devons prendre en compte l'usure due à l'utilisation de notre matériel. Nos ordinateurs ont été beaucoup utilisés durant les heures passées sur le projet soit 1,7 mois réparties sur 14 mois. Par contre le reste du matériel n'a été utilisé que pendant les tests, c'est-à-dire environ 5 jours en cumulé ou 1/6 de mois.

Matériels	Prix d'achat	Dotations
8 ordinateurs portables	6400	777,14
Tablette	425	5,1
Caméra	200	2,38
Camera Vision Nocturne	50	0,6
Carte d'acquisition vidéo	50	0,6

Transformateurs	40	0,5
Connectique	20	0,24
Total	**7585**	**786,56**

e) Frais de déplacements

Nos travaux hebdomadaires se sont en majeures parties déroulés à l'école. Par contre nous avons dû aller sur le lieu de travail d'un de nos clients et nos clients ont dû aussi venir à l'école pour des réunions. Nous pouvons estimer le montant de ces déplacements à : **60€**.

f) Frais divers

Les frais divers sont les frais que nous avons pour le bon fonctionnement du projet. En effet, nous avons aussi besoin de papiers, d'imprimer… Ces frais s'élèvent à **200€**.

g) Bilan

Dépenses	**TOTAL**
Clients/Encadrant	5160
Charges sociales	2322
Charges de structures	600
Dotations aux amortissements	786,56
Frais divers	200
Frais de déplacement	60
TOTAL	**9128,56**

IV.

V. Budget de fonctionnement fictif

Dans le bilan réel précédent il manque le salaire des 6 élèves ingénieurs qui ont travaillé sur le projet pendant 1056 heures. Dans le budget fictif nous comptons ces heures comme celles d'un ingénieur. Nous fixons le salaire brut de l'ingénieur à 40€ par heure. Nous avons donc : **40x1056 = 42 240€.**

De plus, comme précédemment à cela se rajoutent les charges sociales à hauteur de 45% du salaire brut : **0,45 x 42 240 = 21 330€**.

Nous avons donc tous les éléments pour finaliser notre budget :

Dépenses	TOTAL
Ingénieurs	42 240
Clients/Encadrant	5160
Matériels	7585
Charges sociales	21 330
Charges de structures	600
Dotations aux amortissements	786,56
Frais divers	200
Frais de déplacement	60
TOTAL	**77 961,56**

Conclusion

Nous arrivons au total de **77 961,56 €** pour notre budget fictif final. C'est un budget qui nous paraît important pour un travail d'étudiants puisque nous ne sommes pas encore ingénieurs qualifiés. Nous observons également que la grande majorité du budget est dépensé dans nos salaires fictifs (presque deux tiers du budget) et dans les charges sociales de ces derniers et de ceux de nos encadrants et clients (presque un tiers du budget). On voit ici le poids important que représentent les charges sociales pour l'entreprise qui voudrait embaucher des ingénieurs, en comparaison du prix du matériel dont nous avons eu besoin.

Concernant notre prototype, il n'existe actuellement pas de brevet pour une invention similaire, même si certains brevets ont été déposés pour visualiser les vaisseaux sanguins de la main afin de faciliter l'insertion d'aiguilles. Nos clients pourraient donc décider de confier notre projet à des ingénieurs confirmés dans le but de l'améliorer et d'apporter une réelle innovation. Ils pourraient par exemple effectuer la reconstruction des veines en trois dimensions par stéréoscopie à l'aide d'une deuxième caméra. Cette carte des veines en trois dimensions pourrait servir à calibrer le scanner et ainsi à scanner uniquement une zone très précise du corps du patient et donc à éviter de perdre du temps à chercher une zone précise au scanner. On pourrait également penser à améliorer notre prototype en le couplant à une autre méthode de détection comme la thermographie. En faisant aboutir ce projet avec quelques améliorations, nos clients pourraient sûrement déposer un brevet.

Si un brevet est déposé, l'IRCAD, avec les nombreux chirurgiens venant s'y former tous les ans à la robotique médicale, pourrait en profiter pour faire la promotion de ce produit puis le vendre, les clients potentiels étant tous les hôpitaux équipés d'un scanner ou d'une salle d'opération.

Sur le plan personnel, la tenue de notre budget nous a aidés à fournir un travail régulier et systématique et a été formateur. En effet, le contrôle de notre budget nous a forcé à tenir le décompte précis de nos heures travaillées sur le projet, ainsi qu'à rédiger des rapports pour chaque réunion en y faisant figurer les personnes présentes et sa durée.

Annexe 6 : Rapport ressources humaines

<u>Objet du rapport :</u> "Pendant les 18 mois qu'aura duré votre projet, vous avez été confrontés à différentes situations tant au niveau management de projet qu'au niveau management d'équipe.
Si vous vous engagiez demain dans un projet identique, quelle démarche, quels outils, quelle organisation d'équipe mettriez-vous en place afin d'assurer le succès de ce nouveau projet?"

Dans la réalisation d'un tel projet, il est en effet plus que nécessaire de définir de manière très précise, l'organisation de l'équipe, autant d'un point de vue interne qu'externe. Pour ce faire, et grâce à notre expérience du projet, nous avons décomposé les principales clés de la réussite d'un projet en deux parties :

- Fixer des règles de travail et de comportement interne
- Fixer des règles avec les parties externes au projet

I. Règles de travail et comportement interne

Nous avons appris lors de notre projet qui s'est déroulé sur une période d'un an et quatre mois, que l'organisation interne de l'équipe était à la base de la réussite. Nous nous sommes rendu compte que la mise en place du projet et notre approche vis-à-vis de l'organisation ont rapidement été un indicateur de succès.

Cette partie sur le fonctionnement interne de l'équipe sera décomposée en trois parties : l'organisation de l'équipe, la responsabilisation des membres, et les outils d'évaluation de l'avancement.

Il paraît évident, dans la réalisation d'un tel projet, qu'avec une équipe composée de six membres, un encadrant et deux clients, la communication et l'organisation du groupe sont des éléments gage de réussite.

i. Organisation de l'équipe

L'organisation de l'équipe doit, pour nous et suite à l'expérience que nous avons vécue, être centrée sur une communication sans tabous, intense et claire. La tâche la plus importante afin de favoriser cela est la création de différents moyens de communication efficaces, afin que chacun puisse, à n'importe quel moment, entrer en contact avec les autres, les informer de son travail, et éventuellement signaler des problèmes rencontrés. Pour ce faire nous avons créé un compte *Facebook* pour la communication quotidienne afin de « poster » des nouvelles sur l'avancement de son travail, des sources que l'on souhaitait

instantanément partager avec les autres, des images, rapports, ou prévenir le groupe d'une prochaine réunion ou d'un rendez-vous. L'avantage de ce moyen de communication est qu'il nous permet d'être sûrs que chacun a vu l'information (grâce à la rubrique « vu » lorsque quelqu'un publie quelque chose). Nous attendons systématiquement une réponse de validation de chacun, dans le but d'éviter les absences des membres. Comme cela, si quelqu'un ne remplit pas la tâche qui lui a été confiée, ou oublie une réunion, il en est le seul responsable. Il n'y a pas de manque de communication au sein du groupe grâce à ce moyen de communication que nous avons privilégié.

La deuxième clé pour une bonne réussite de projet, est l'élaboration et le suivi d'un planning. En effet, il est très important de lister les tâches principales à réaliser, de manière exhaustive, et de les décomposer en sous-tâches, afin de pouvoir appréhender de la façon la plus précise le travail à réaliser. A partir de cela, il faut évaluer le temps que l'on se donne pour effectuer chaque tâche, et nommer un responsable pour chaque grande partie. C'est cette personne qui s'assurera alors que le travail est réalisé dans les temps, et que chaque tâche avance bien selon ce que l'équipe avait prévu dans le planning. Lors de chaque réunion de projet, un point est fait sur chaque partie avec les différents responsables pour voir si le planning est bien respecté, et, le cas échéant, faire des modifications sur ce dernier. Cependant, il est important de noter que tous les membres, sans exception, doivent être au moins une fois responsable d'une tâche, sans quoi un membre peut avoir l'impression d'être en retrait, ou de se sentir inférieur aux autres membres, ce qui peut être contre-productif et engendrer une attitude négative. Il faut toujours privilégier la dynamique par la motivation. Tout doit être organisé de manière à ce qu'aucun membre n'ait pas l'impression d'avoir toujours les tâches « corvées » à réaliser. Il faut également rappeler que l'un des enjeux d'un projet est de tirer le meilleur de chacun des membres de l'équipe. Pour cela, il faut prendre en considération les préférences de chacun afin de répartir les différentes tâches de manière cohérente et efficace afin d'en tirer le meilleur profit. Il faut toujours privilégier le débat entre les membres afin de trouver un compromis. Cependant, il arrive que ce soit difficile de trouver un accord, c'est le rôle du chef de projet, ou du responsable de partie en question, de trancher.

Afin de rester en permanence connecté avec son équipe, il nous a paru d'une importance primordiale de fixer des réunions régulièrement et périodiquement afin de faire le point sur le travail effectué et surtout de valider les différentes étapes du projet tous ensembles. Il ne faut surtout pas hésiter à prendre le temps de discuter pour trouver un compromis, parler avec les camarades qui sont extérieurs au problème permet même parfois de trouver des solutions que nous n'aurions pas vues autrement.

ii. Responsabilisation des membres

Dans notre recherche constante d'efficacité, nous avons réfléchi dès le début à la meilleure manière de nous organiser. Comme nous l'avons exposé précédemment, nous avons mis en place plusieurs méthodes et outils qui nous ont permis de minimiser les malentendus et la perte de temps. Cependant, pour la réussite d'un tel projet, il faut réussir à fédérer le groupe, à créer une ambiance de travail émulatrice, mais également savoir prendre des décisions. Le cadre du projet ingénieur de Télécom Physique Strasbourg est assez atypique par le fait qu'il est difficile de dégager un leader par l'expérience et l'expertise comme cela peut l'être dans un autre cadre. Il faut donc s'organiser de manière à optimiser le management. Un chef de projet a été désigné à l'origine. Il a pour rôle d'organiser l'équipe et de trancher en cas de litige. Cependant, comme tout le monde possède le même niveau d'expertise scientifique, nous avons naturellement opté pour un management participatif qui favorise la responsabilisation des individus, aussi bien en termes de travail à effectuer, qu'en termes d'organisation et de comportement. Pour gérer les moments de crise ou lorsqu'il y a eu des problèmes, que ce soit dans l'implication ou dans le respect des engagements vis-à-vis du planning, nous n'avons pas hésité à exhiber les problèmes pour les résoudre et rétablir une dynamique de groupe, tout de suite, afin d'éviter une perte de confiance des membres. Cette manière d'aborder les choses fut une franche réussite concernant notre projet. Nous avons su, en faisant preuve de réactivité et d'intelligence, exposer les problèmes et recevoir les critiques, ce qui nous a permis de nous remettre en question et de garder la meilleure dynamique possible du début à la fin. Si nous devions recommencer un projet de la sorte, nous continuerions dans cette voie car cela a été une des clés de notre réussite collective.

iii. Outils de suivi et de vérification

Notre politique de suivi de l'avancement a reposé sur l'importance des documents écrits. Chaque membre s'est efforcé à réaliser un rapport final de chaque travail, afin d'expliquer de manière claire, et facilement consultable par les autres, le contenu de son travail. C'est important de montrer que l'on travaille régulièrement, cela rassure l'ensemble de l'équipe et il s'ensuit une meilleure cohésion de l'équipe, une confiance accrue et une meilleure solidarité. De plus, à l'issue de chaque réunion d'équipe (que nous avons programmées de manière périodique), des rencontres de groupe afin de discuter de vive voix de notre avancement, des modifications éventuelles de planning ou de tâches, nous rédigions un rapport d'activité. Cela nous permet de valider ces changement tous ensemble, pour que tout le monde suive bien les modifications. Tout cela est ensuite acté par écrit sous forme de compte rendu ou de rapport, qui sera ensuite mis à disposition de tous les membres, via notre boite mail de projet.

Nous nous sommes également rendu compte de l'importance de définir une politique qualité sur le plan technique approfondie. Il est très important, dès la réception, de tester techniquement le matériel et de vérifier qu'il corresponde bien au cahier des charges et aux besoins du client. Afin de juger de sa satisfaction ou non, nous sollicitions systématiquement un retour de sa part. Cette demande se fait sous forme de questionnaire précis et concis.

La dernière partie concernant le suivi, est la comptabilisation des heures de travail engendrées et des différentes ressources mises en œuvre par chaque membre du projet. Même si il paraît bien plus important de s'attacher au résultat par rapport au temps effectif passé sur une tâche, il est très important, autant pour la partie financière que pour la partie organisation du planning, de suivre l'avancement de chacun. Pour cela, le responsable financier avait en charge de récupérer un relevé détaillé de tous les membres en fin de semaine, sous forme de fichier Excel pré-rempli, afin de savoir combien de temps avait été passé sur quelle tâche, en détails. Cette méthode s'est avérée plutôt efficace dans le suivi, même si la période d'une semaine, peut s'avérer parfois un peu trop courte.

II. Fixer les règles avec des parties externes du projet

Une fois le fonctionnement de l'équipe bien défini en interne, il faut également avoir une politique de communication claire avec les différents acteurs extérieurs à l'équipe projet. Nous pensons ici aux clients, à l'encadrant, et à l'équipe de pilotage.

i. Communication

Tout d'abord, afin de communiquer, il faut définir un moyen de communication. Nous avons tout de suite décidé de créer une adresse mail au nom de notre projet (projetingenieur6@gmail.com), dans le but d'offrir un outil simple pour joindre nos clients, mais également comme un moyen de stockage efficace de tous les documents de l'équipe. Même si des sauvegardes doivent être faites au fur et à mesure sur différents ordinateurs, cette boite mail est un moyen de centraliser tous nos rapports et les différentes informations partagées avec clients et encadrant. Pour les membres du groupe, cela doit être le seul moyen de communication officiel, pour faciliter la relation. Le client sait qu'il parle au groupe et le groupe devient alors un interlocuteur « unique », plutôt que chacun se serve de son adresse mail personnelle par exemple. Les autres membres de l'équipe sont dans ce cas loin de la discussion et ne peuvent donc pas suivre les évolutions, ce qui est mauvais pour la productivité.

Dans la relation avec ces derniers, il est également très important de s'accorder sur la fréquence des réunions au cours de tout le projet et de s'assurer que cela est bien réalisable pour les deux parties. Le mettre en forme sur un planning est une bonne idée afin d'être sûr

qu'elles pourront vraiment avoir lieu. A l'issu de ces dernières, un rapport doit être envoyé aux clients, comme cela, il nous permet de nous souvenir des décisions des clients. Si ces derniers ne sont pas d'accord, ou qu'il y a encore un malentendu, c'est également un bon moyen pour le vérifier. L'évolution de notre travail est présentée lors des réunions, mais également chaque quinzaine, avec une revue du travail réalisé et de celui qui est en prévision des prochains quinze jours suivants. C'est pour les clients et l'encadrant, un bon moyen de vérifier également, l'avancement des tâches.

Nous nous sommes également rendu compte de l'importance de garder une trace écrite de chaque action d'un client, que ce soit en terme de livraison de matériel, de date de réunions, etc. car nous pouvons nous en servir de preuve le cas échéant, si il y a litige. Dans ce sens, un cahier des charges très précis doit être établi, validé et signé par les clients. Toute modification, décidée en commun, doit faire également l'objet de la rédaction d'un nouveau cahier des charges et d'une nouvelle phase de validation. Car, si cette dernière tâche est omise, nous n'avons pas de preuve pour dire que les changements que nous avons proposés sur notre travail, correspondent bien aux changements d'idées des clients.

Pour conclure cette partie, il apparaît très clairement qu'il est primordial de bien communiquer avec les clients. Il ne faut pas hésiter à exposer un problème, faute de quoi nous pouvons être tenus pour responsables sans que nous puissions nous justifier autrement que verbalement, ce qui n'a pas de valeur.

ii. Suivi des engagements

Chaque équipe de projet a bien sûr de nombreux engagements, et tous les outils présentés plus tôt sont là pour aider à y répondre de la meilleure des façons, mais il faut également être conscient que les clients ont des engagements envers nous. Pour cela, nous devons également mettre en place une politique de suivi des tâches et des obligations de leur part afin de ne pas souffrir de retards de leur part. Etant relativement dépendants pour certaines parties du projet (matériel à acheter, matériel qui doit être mis à disposition par le client, aide sur des domaines précis, etc.), nous devons nous assurer que ce qui doit nous être remis le sera bien en temps et en heure. Il ne faut pas hésiter à leur demander des preuves papier, et surtout bien leur faire comprendre que le projet n'est pas à prendre à la légère, que les engagements sont faits pour être respectés.

Dans la mesure du possible, il est également important de faire en sorte que les intérêts ne se mélangent pas entre encadrants et clients, et, afin de l'éviter, de plutôt restreindre les questions d'ordre technique avec l'encadrant.

III. Conclusion

Pour conclure, cette expérience a été très riche en enseignements en ce qui concerne la gestion d'équipe mais aussi la gestion de projet.

Nous nous sommes retrouvés confrontés à des situations délicates de tous ordres. Que ce soit au niveau interne avec certains problèmes d'implication au début, que des difficultés de communication éprouvées avec l'un de nos clients, nous avons pu nous rendre compte, que tout cela était est beaucoup plus simple à gérer quand tout est organisé sur une base solide, décidée au préalable. Grâce aux différents outils exposés dans ce rapport, nous avons réussi à faire cohabiter les intérêts collectifs et personnels pour faire aboutir ce projet du mieux possible en mettant de côté les sentiments personnels, ce qui nous servira sans aucun doutes dans notre vie professionnelle future. En ce qui concerne les clients, grâce à des plans de risque et à l'anticipation de solutions annexes en cas d'échec, nous avons pu nous mettre à l'abri d'un désistement, et continuer à travailler dans le bon sens, en ne perdant pas notre feuille de route de vue.

Si nous avions à refaire un projet de la sorte, nous nous appuierions sur cette base d'organisation, en essayant bien sûr de la rendre plus efficace, en essayant d'être encore plus précis dans notre manière de nous s'organiser.

Annexe 7 : Questionnaire qualité

Nous voulons optimiser nos méthodes de travail, nos relations et satisfaire au mieux vos besoins d'informations quant à notre avancement dans le projet. C'est pourquoi je vous transmets un questionnaire qui va permettre de nous éclairer sur les améliorations que nous pourrions apporter à notre collaboration.

Cela fait maintenant 2 mois que notre projet a débuté :

1) Etes-vous satisfait de la fréquence des rapports de notre avancement que nous vous envoyons (1 rapport toutes les 2 semaines) ?

2) Ces rapports vous semblent-ils complets et clairs ? Doit-on entrer plus dans les détails ?

3) Pensez-vous que nous vous sollicitons assez à travers nos mails ? Trop peut-être ?

4) Pensez-vous qu'une réunion mensuelle suffit-elle au bon avancement de notre projet pour le moment ?

5) La répartition en 2 groupes pour traiter en parallèle les faisabilités juridiques et techniques vous parait-elle judicieuse ?

6) Avez-vous des remarques à faire sur nos méthodes de travail ? Des conseils ?

7) De manière générale, êtes-vous satisfait du travail fournit par notre équipe ? Communication ? Travail ? Attitude ?